

Contrôle de tension de serrage par ultrasons

par **Farid BELAHCENE**

Docteur Ingénieur, fondateur de la société ULTRA RS (France)

Note de l'éditeur

Cet article est la version actualisée de l'article R 4 040 intitulé « Contrôle de tension de serrage par ultrasons » rédigé par Farid BELAHCENE et paru en 2015.

1. Différentes méthodes de mesure	R 4 040v2 - 2
2. Principe de la méthode de mesure	— 3
2.1 Théorie de l'acoustoélasticité	— 3
2.2 Application de la théorie de l'acoustoélasticité à la mesure de tension dans les vis	— 4
2.3 Type d'onde utilisé pour la mesure de la tension de serrage	— 5
2.4 Approche pratique	— 6
2.5 Paramètres d'influences sur la mesure de la tension de serrage	— 7
3. Applications et retours d'expériences	— 10
3.1 Exemples d'applications dans les secteurs nucléaire et hydraulique	— 10
3.2 Quelques applications industrielles en cours de développement	— 11
4. Conclusions	— 13
5. Glossaire	— 13
Pour en savoir plus	Doc. R 4 040v2

4

Les serrages insuffisants, excessifs ou hétérogènes représentent environ 30 % des défaillances statiques, et les mauvaises conditions de serrage 45 % des défaillances en fatigue. Ils sont un problème récurrent dans l'ensemble des industries : transport, raffinerie, nucléaire, construction navale, etc. avec un fort impact financier et humain.

Les assemblages vissés ou boulonnés sont au cœur de la sécurité de nombreuses structures industrielles.

Pour obtenir un assemblage fiable, il est nécessaire d'utiliser des éléments de fixation de qualité respectant des caractéristiques mécaniques normalisées, de contrôler sa mise en place en s'assurant de sa reproductibilité et de contrôler sa résistance dans le temps.

Pour optimiser la fiabilité d'un assemblage, deux phases sont nécessaires : prototype et production.

En phase prototype, l'objectif est de vérifier et valider les conditions de serrage minimales : essais de chute de l'assemblage, de chocs, de vibrations répétées et d'augmentations de la température auxquels est soumis un assemblage. Une méthode de contrôle précise est nécessaire pour vérifier les valeurs des tensions de serrage après ces essais.

En phase de production, l'objectif est de créer une spécification de l'assemblage incluant l'ensemble de ses caractéristiques et particulièrement les points suivants : pièces de l'assemblage, consigne de serrage, classe de précision, moyen de serrage, méthode de contrôle des tensions de serrage...

La validation de cette spécification doit être approuvée et validée par le bureau d'études, les méthodes et la qualité.

D'où la nécessité de maîtriser l'opération de serrage avec un outillage précis et fiable.

1. Différentes méthodes de mesure

Il y a eu un fort besoin d'évaluer la tension de serrage dans les assemblages vissés de façon non destructive dans l'objectif de mieux maîtriser les procédés d'assemblage et de garantir sa fiabilité. En effet, même un assemblage optimisé vis-à-vis du dimensionnement de ses éléments de fixation aura une tenue médiocre si l'opération de contrôle de la tension de serrage a été mal réalisée.

Des instruments portables ou transportables ont été développés pour répondre à ces besoins, et sont désormais disponibles dans le commerce. Ils fournissent des informations (couple, tension, allongement, angle) sur la qualité de serrage réalisée sur un assemblage.

Pour contrôler le serrage, il existe différentes méthodes.

Mesures du couple de serrage

Les méthodes les plus répandues sont celles basées sur la mesure du couple de serrage. Même si la précision de mesure de couple est correcte, il reste une grande incertitude sur la tension de serrage de la vis. Le résultat du serrage final dépendra des coefficients de frottement au niveau des filets de la vis et au niveau de la surface de contact (sous la tête de la vis). Le problème du serrage avec contrôle de couple est dû à la fluctuation des coefficients de friction. La dispersion liée aux coefficients de frottements entraîne une dispersion sur la valeur de précontrainte installée pouvant aller jusqu'à 30%.

Malgré ces inconvénients, la procédure de serrage avec contrôle de couple est de loin la procédure la plus couramment utilisée. Cela est dû au fait qu'il s'agit d'une procédure technique relativement simple.

La relation liant le couple de serrage à la précontrainte est linéaire et la formule la plus couramment employée est la formule de Kellermann et Klein.

$$C = P_r (0,161p + 0,583\mu_t d_2 + 0,25\mu_h (D_{ext} + D_{int})) \quad (1)$$

avec

C	couple de serrage,
P_r	précontrainte installée,
p	pas de la fixation,
μ_t	coefficient de frottement dans les filets,
d_2	diamètre équivalent des filets,
μ_h	coefficient de frottement sous la tête de vis (ou de l'écrou),
D_{ext} et D_{int}	diamètres externe et interne de la tête de vis (ou de l'écrou)

Le serrage au couple est généralement utilisé en contexte industriel *via* des clés dynamométriques, visseuses hydrauliques, pneumatiques ou électriques

Procédure d'acquisition d'angle

Le serrage à l'angle. Il est possible d'associer la procédure de serrage avec contrôle de couple avec une procédure d'acquisition d'angle. C'est à la fois l'angle de rotation et le couple qui sont utilisés comme critères de contrôle.

Le serrage est réalisé en deux étapes. On applique d'abord à l'écrou du boulon un couple légèrement inférieur au couple nominal théorique et on lui impose ensuite un angle de rotation précis. La dispersion sur l'effort de tension est réduite mais l'incertitude reste non négligeable et on risque d'augmenter sensiblement la contrainte de torsion « parasites » ;

Feras Alkatan décrit les différentes étapes de ce type de serrage

Dans la figure 1 [11], on considère :

OA : accostage des pièces

AB : zone de proportionnalité effort/angle

BC : zone de déformation plastique

La relation de proportionnalité entre l'effort Q et l'angle θ peut être calculée en utilisant la formule :

$$Q = \frac{C_s}{0,161p + 0,583\mu_t d_2 + \mu_h r_m} + \frac{\theta}{360(S_b + S_p)(0,161p + 0,583\mu_t d_2) S_t} p \quad (2)$$

avec

C_s	couple de serrage jusqu'à l'accostage,
Q	précontrainte installée,
p	pas de la fixation,
μ_t	coefficient de frottement dans les filets,
d_2	diamètre équivalent des filets,
μ_h	coefficient de frottement sous la tête de l'élément mis en rotation (vis ou écrou),
r_m	rayon moyen d'appui sous la tête de l'élément (vis ou écrou) mis en rotation,
$S_b + S_p$ et S_t	respectivement souplesses du boulon, des plaques et souplesse en torsion de la vis.

Contrôle d'élongation ou mesure par comparateur

La relation mathématique entre l'élasticité de la vis et la tension (précontrainte) de serrage est plus précise que la relation entre le couple et la tension de serrage. Une **mesure directe de l'élasticité** conduit ainsi à **des valeurs de précontrainte plus précises**. Cela peut être obtenu par la mesure mécanique du perçage dans une vis, qui doit être plus profond que la longueur de tension de la vis utilisée.

Cette méthode ne trouve pas beaucoup d'applications dans la pratique étant donné qu'elle ne concerne que des vis ou goujons de grande taille. Cette méthode présente d'autres inconvénients car elle génère un surcoût à cause du perçage de la vis ou de goujon en son milieu ; et la vis et le goujon sont fragilisés (concentration de contraintes)

On peut également mesurer l'allongement de la vis par l'intermédiaire de fibres optiques à réseaux de bragg placées au cœur de la vis, laquelle nécessite donc également un perçage.

Le principe de mesure consiste à graver des réseaux de bragg sur une fibre qui va alors se comporter de la même façon qu'une

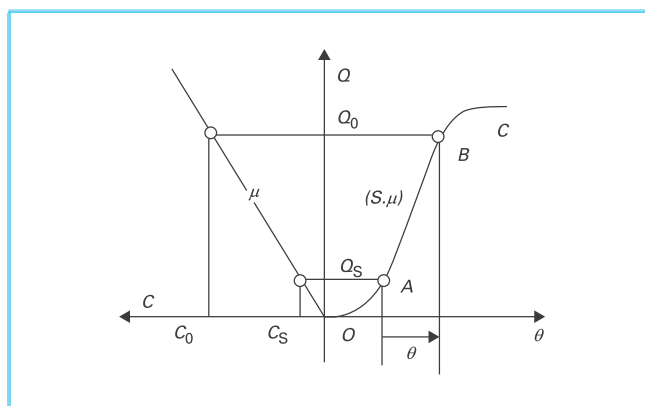


Figure 1 – Courbe précontrainte/angle lors du serrage

jauges de déformation : l'allongement axial de la fixation se traduisant par une variation de la longueur d'onde réfléchi par le réseau. L'idée a été déposée par Hay (voir figure 2 [12]).

■ **Méthodes extensométriques**

Il existe également les méthodes extensométriques où un capteur d'effort (rondelle avec des jauges de déformation) est utilisé comme rondelle. La précision est bonne et la mise en œuvre est aisée. L'inconvénient de cette technique est de munir chaque vis d'un capteur d'effort, ce qui rend le prix du contrôle important

Rotabolt : les Rotabolt sont un autre type de fixations instrumentées. L'idée n'est pas de mesurer l'allongement axial induit par la prétension, mais plutôt la contraction radiale. Ces vis sont équipées d'un axe passant dans un alésage au cœur de vis. Lorsque la prétension augmente, la contraction radiale augmente également jusqu'à ce que l'axe ne puisse plus tourner.

■ **Méthode ultrasonore**

Sur laquelle repose l'innovation présentée dans cet article, permet de mesurer directement la tension dans la vis, aussi bien lors du serrage que plus tard, pour vérifier qu'aucune dérive de montage n'ait eu lieu. Cette méthode repose sur le principe de mesure du temps de vol d'une onde ultrasonore se propageant le long de la vis.

Les atouts de la méthode ultrasonore résident dans le fait que c'est une technique quantitative, précise et non destructive, facile à mettre en œuvre, permettant des mesures en continu (suivre le serrage en temps réel), et qui est indépendante des coefficients de frottement.

Il est intéressant de noter une grande diversité dans les moyens mis en œuvre pour arriver à contrôler la prétension de serrage dans les fixations. Par ailleurs, toutes les technologies n'ont pas été présentées ici, en raison de leur trop grand nombre. Cela montre que ce sujet fait l'objet de nombreux travaux et qu'il constitue une vraie problématique industrielle.

À retenir

- Il existe différentes méthodes de contrôle qui fournissent des informations (couple, tension, allongement, angle) sur la qualité de serrage réalisée sur un assemblage
- Il existe des méthodes liées aux frottements au niveau des éléments filetés de l'assemblage et d'autres non
- La dispersion induite par frottement sur la valeur de couple de serrage appliqué pouvant aller jusqu'à 30 %
- La méthode ultrasonore permet de mesurer la prétension de serrage indépendamment de frottements dans les assemblages par éléments filetés

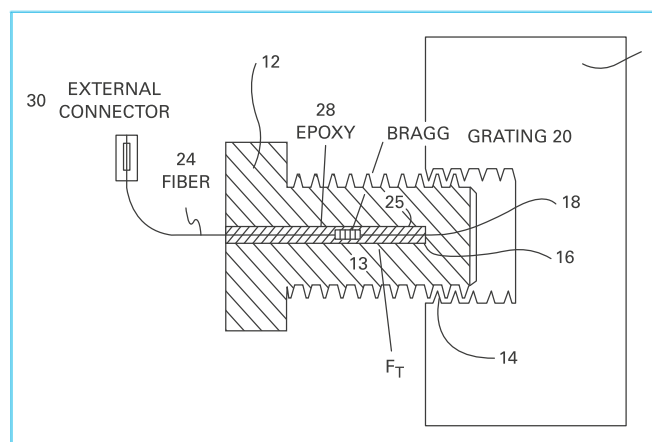


Figure 2 - Principe d'application issu de Hay

2. Principe de la méthode de mesure

L'application d'une tension électrique sur l'élément piézoélectrique dans un transducteur fait que le matériau piézoélectrique oscille en créant des ondes sonores qui se déplacent du transducteur, à travers le liquide ou le milieu de couplage et dans la vis. Ce type d'onde ultrasonore parcourt la longueur d'une vis. La vitesse acoustique d'un matériau représente la vitesse à laquelle l'onde se déplace à travers lui. Tous les matériaux ont une vitesse acoustique représentative, ou théorique, mais la vitesse acoustique réelle peut varier d'un échantillon à l'autre du même matériau et même dans tout le matériau d'un échantillon particulier.

Il est important de réaliser que la vitesse acoustique réelle n'est pas vraiment une constante. Elle varie entre les éléments de fixation (vis, goujon, boulon) d'un matériau similaire, même lorsque la composition du matériau de l'élément de fixation est étroitement contrôlée. Cette variation résulte généralement de la contrainte résiduelle dans le matériau résultant des processus de fabrication et de traitement thermique.

4

Une onde ultrasonore est transmise d'un transducteur à l'extrémité d'un élément de fixation. Lorsque l'onde ultrasonore rencontre un changement brusque de densité, comme la fin de la vis (fond), la majeure partie de l'onde se reflète. Cette réflexion remonte la longueur de la vis et dans le transducteur. Lorsque l'onde fait osciller l'élément piézo-électrique, un petit signal électrique est produit. Ce signal est représenté sur l'écran de l'appareil comme une onde sinusoïdale. C'est sur cette onde sinusoïdale affichée que l'on peut voir l'événement de fin de parcours qui déclenche une mesure. Cette onde parcourant la longueur de la vis est illustrée à la figure 3.

2.1 Théorie de l'acoustoélasticité

La détermination des contraintes par ultrasons est basée sur la dépendance entre la vitesse de propagation des ondes ultrasonores et l'état de contrainte dans le matériau. Lorsqu'un matériau est soumis à une contrainte, on constate une variation de la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore. Cette variation est due à des effets élastiques non linéaires formalisés par Murnaghan [2].

S'appuyant sur les travaux de Murnaghan concernant l'élasticité non linéaire en milieu isotrope, le premier travail en acoustoélasticité a été effectué par Hughes et Kelly qui, en 1953, ont montré que, pour certains états de contraintes (compression uniaxiale et de pression hydrostatique), les variations des vitesses des ondes longitudinales et transversales peuvent être précisément prédites en modélisant le matériau comme ayant la fonction d'énergie de déformation proposée par Murnaghan. Cette dernière fait intervenir des termes d'ordre trois de la déformation qui conduisent à une non-linéarité des relations constitutives [3].

Remarque

En plus des deux constantes classiques de l'élasticité linéaire, trois constantes élastiques, appelées constantes de Murnaghan ou constantes de troisième ordre, sont nécessaires pour la description d'un matériau isotrope.

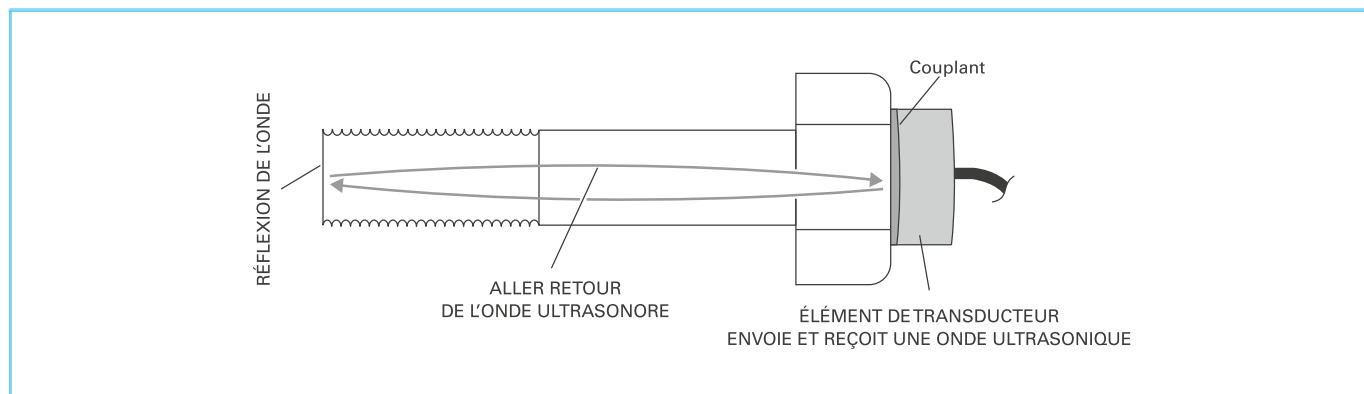


Figure 3 – Parcours de l'onde ultrasonore dans une vis.

Pour un milieu soumis à un chargement uniaxial dans la direction 1 (2 et 3 étant perpendiculaires), les vitesses des ondes élastiques s'écrivent en fonction de la contrainte :

$$\begin{aligned} \rho_0 V_{11}^2 &= \lambda + 2\mu + (2l + \lambda)\theta + (4m + 4\lambda + 10\mu)\alpha_1 \\ \rho_0 V_{12}^2 &= \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_2 - \frac{1}{2}n\alpha_3 \\ \rho_0 V_{13}^2 &= \mu + (\lambda + m)\theta + 4\mu\alpha_1 + 2\mu\alpha_3 - \frac{1}{2}n\alpha_2 \end{aligned} \quad (3)$$

avec

- ρ_0 masse volumique à l'état non contraint,
- V_{ij} vitesse de propagation d'une onde se propageant suivant la direction i et polarisée suivant la direction j ,
- λ et μ constantes de second ordre de Lamé,
- l, m, n constantes de troisième ordre de Murnaghan,
- $\theta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ trace de tenseur de déformation.

En linéarisant au premier ordre, le système d'équations (3) peut se réécrire sous la forme :

$$V_{ij} = V_{ij}^0 (1 + A_{ij}\sigma_{11}) \quad (4)$$

avec

- V_{ij} vitesse de l'onde se propageant dans la direction i et ayant un déplacement particulière dans la

Lors de son serrage, deux effets vont faire augmenter le temps de parcours des ondes ultrasonores. L'**effet acoustoélastique** tout d'abord, qui est l'effet direct provoqué par la contrainte de traction dans la vis. Celui-ci tend à diminuer la vitesse de propagation de l'onde ultrasonore et, par conséquent, à augmenter son temps de parcours. Ensuite, l'**effet d'allongement de la vis**, qui a un impact sur le chemin parcouru par l'onde et ainsi tend à faire augmenter son temps de propagation.

En considérant un modèle à une dimension pour calculer la réponse de l'onde plane en fonction du chargement uniaxial (figure 5). La longueur totale du boulon libre est L_0 et la vitesse de l'onde longitudinale sans contrainte est V_0 ; l_N et l_H sont respectivement les longueurs de l'écrou et de la tête du boulon.

Quand une contrainte de traction σ est appliquée le long de la tige, un petit segment dx dans la tige du boulon est allongé d'une valeur de $\left(1 + \frac{\sigma}{E}\right) dx$, où E est le module de Young du matériau.

En admettant que la vitesse de l'onde V varie linéairement avec la contrainte axiale σ :

$$V = V_0 (1 + K\sigma) \quad (5)$$

avec

- V_0 vitesse de l'onde à l'état libre,



La suite de cet article ne fait pas partie de l'extrait en consultation gratuite.

Si vous souhaitez accéder au contenu intégral de cette base documentaire, rendez-vous à la fin de ce document.

Et pour toute question sur nos offres d'abonnement, n'hésitez pas à contacter le service Relation clientèle au 01 53 35 20 20 ou par email à l'adresse infos.clients@teching.com.