



**HAL**  
open science

## Vers un serrage intelligent dans les assemblages aéronautiques

Charly Foissac, Alain Daidié, Stéphane Segonds, Clément Chirol

► **To cite this version:**

Charly Foissac, Alain Daidié, Stéphane Segonds, Clément Chirol. Vers un serrage intelligent dans les assemblages aéronautiques. 17ème colloque national S-mart AIP-PRIMECA, Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], Mar 2021, LAVAL VIRTUAL WORLD, France. hal-03296145

**HAL Id: hal-03296145**

**<https://hal.science/hal-03296145v1>**

Submitted on 22 Jul 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Vers un serrage intelligent dans les assemblages aéronautiques

Charly FOISSAC

Université de Toulouse, Institut Clément Ader, UMR CNRS  
5312, INSA/UPS/ISAE/Mines Albi  
Toulouse – France  
charly.foissac@insa-toulouse.fr

Stéphane SEGONDS

Université de Toulouse, Institut Clément Ader, UMR CNRS  
5312, INSA/UPS/ISAE/Mines Albi  
Toulouse – France  
stephane.segons@univ-tlse3.fr

Alain DAIDIE

Université de Toulouse, Institut Clément Ader, UMR CNRS  
5312, INSA/UPS/ISAE/Mines Albi  
Toulouse – France  
alain.daidie@insa-toulouse.fr

Clément CHIROL

Airbus Operation S.A.S  
Toulouse – France  
clement.chirol@airbus.com

**Résumé—** Les perturbations exogènes, les tolérances des assemblages boulonnés et le nombre élevé de combinaisons et de configurations rendent difficile la maîtrise de la précharge dans les assemblages boulonnés. La mesure directe de la précharge des assemblages n'étant pas possible en dehors d'essais de laboratoire, l'objectif du serrage intelligent serait de compenser les dispersions actuelles grâce à la détection des événements au cours de la phase de serrage qui sont impactants sur la valeur finale de la précontrainte. En raison du grand nombre de paramètres possibles comme le revêtement ou le diamètre dans le choix d'un assemblage boulonné, cet article se concentre sur une liste précise des paramètres et les sources de dispersions majeures qu'ils induisent. Il montre tout d'abord que le couple de contact est un paramètre clé de pilotage de la précontrainte installée dans l'assemblage. Il est ensuite démontré que les dispersions sur les paramètres de l'assemblage perturbent l'évaluation du couple de serrage et qu'il convient donc de limiter ces dispersions, afin de réduire l'incertitude sur la précontrainte dans l'assemblage. Une méthode pour détecter ce couple de contact avec les données mesurables d'une visseuse est également présentée. Ainsi, le serrage intelligent pourra offrir un meilleur respect de la consigne de précharge et limiter les risques de sur ou sous-couple. De plus, il permettra aussi de mieux comprendre les phénomènes internes des assemblages boulonnés comme le transfert de charge aux interfaces des pièces serrées.

**Mots-clés :** Serrage, intelligent, dispersions, détection, contact.

## I. INTRODUCTION

Importer une certaine force de compression entre la tête de vis et l'écrou, appelée précharge, au sein d'un assemblage boulonné permet d'assurer un niveau de performance avantageux à condition de maîtriser l'intervalle dans lequel se situe la précontrainte. Les principaux avantages dans le domaine aéronautique que peut apporter une précharge contrôlée sont :

- Augmenter la durée de vie [1],
- Assurer une meilleure étanchéité [2],
- Assurer une protection contre la foudre [3],
- Ecarter le risque de dévissage spontané [4].

Cependant, il y a un seuil maximum à ne pas dépasser au risque d'obtenir le résultat inverse escompté. Bien conscient de l'importance de la précharge dans les assemblages boulonnés structuraux, de nombreux industriels ont développé des méthodes internes et externes de mesure de la précharge d'une fixation. On retrouve des indicateurs de tension indirect comme des outils de mesure à ondes ultrasonores [5], des indicateurs de tension direct avec des inserts dans le fût de vis ou encore des indicateurs tiers comme des rondelles piézoélectriques sous tête de vis [6]. Cependant, la technicité et le coût de ces solutions technologiques ne permettent pas une utilisation à grande échelle.

Malheureusement, les méthodes actuelles qui résultent d'un compromis entre précision, facilité d'installation et durée d'utilisation, comme le serrage au couple, n'offrent pas une grande précision de la précharge. L'objectif du serrage intelligent est d'asservir la précharge grâce à l'analyse des paramètres de serrage (couple, angle, vitesse de serrage...). L'enjeu industriel est d'appliquer cette nouvelle technique de contrôle de serrage sans avoir à changer les moyens de serrage actuellement utilisés en production. Pour cela, la campagne expérimentale menée en amont et présentée dans cet article constitue une source fiable d'informations sur le comportement des boulons. Elle permet de recenser les paramètres qu'il est incontournable de mesurer pour assurer le pilotage adéquat de la phase de serrage.

## II. LES SOURCES DE DISPERSION

Le serrage au couple conventionnel est connu pour être dispersif, de l'ordre de  $\pm 30\%$  [7] [8]. Ce constat pratique est assez éloigné de la précision qu'affichent les fournisseurs sur les performances d'outils de serrage au couple qui sont qualifiés en laboratoire et pour des conditions d'application de serrage très contrôlées. La variation de la précharge au sein de la fixation, après serrage, peut influencer sur d'importantes caractéristiques d'un assemblage boulonné. De la diminution de la durée de vie à la rupture du boulon, la limite est parfois étroite. Les

dispersions listées dans le Tableau 1 représentent les sources prédominantes identifiées en production. Même si ces incertitudes sont intrinsèques à chaque type d'assemblage, ce n'est pas pour autant qu'elles sont maîtrisées ou connues. On distingue 3 types de dispersions : (i) celles liées à la fixation utilisée que l'on appellera internes, (ii) celles liées à l'environnement de serrage que l'on appellera externes et (iii) celles liées au procédé de serrage.

Dispersion		
Catégorie	Source	Type
Jeu d'assemblage	Interférence dans l'alésage	Externe
	Écart entre les pièces	Externe
Revêtement	Frottement	Interne
Géométrie	Tolérance de fabrication	Interne
	Ovalisation de l'écrou	Interne
Outillage	Vitesse de serrage	Technique
	Étalonnage défectueux	Technique

Tableau 1. LISTE DES PRINCIPALES DISPERSION DANS LE PROCESSUS DE SERRAGE

Les dispersions internes vont directement impacter le comportement du serrage. Elles interviennent dans la transformation du couple de serrage en effort de précharge. Par exemple, la tolérance sur le pas du filet de la vis peut induire des dispersions, si l'on serre à l'angle. De même, le frottement qui est lié au revêtement peut être une source de dispersion lorsque l'on serre au couple. Les dispersions externes impactent sur la réponse de la compression de l'ensemble des pièces serrées entre la tête de vis et l'écrou que nous allons appeler « interface ». Par exemple, un jeu axial entre les pièces de l'interface va modifier la raideur de l'assemblage à serrer. Les dispersions techniques liées aux outils de serrage sont considérées comme imprévisibles, même si le protocole de serrage est censé être connu et vérifié. De plus, les outils dans le contexte aéronautique sont associés à la fois à la consigne et à la mesure du serrage. Ainsi, un changement involontaire de la vitesse de serrage va impacter la consigne de serrage, de même qu'une déviation de l'étalonnage va impacter la mesure du couple ou de l'angle de serrage.

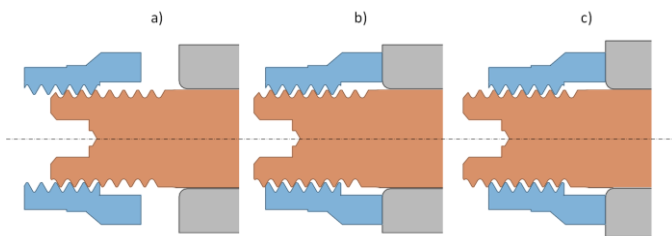


Figure 1. A) APPROCHE DE L'ECROU - B) CONTACT - C) SERRAGE

Le point important dans ces trois types de dispersions est l'instant où elles interviennent. Lors du processus de serrage (Figure 1), avec l'écrou (en bleu), la vis (en orange) et l'interface (en gris), on distingue trois phases inévitables. La phase d'approche de l'écrou, correspond à la totalité des surfaces des filets qui rentrent en contact avec ceux de la vis, avec l'apparition du couple résistant de freinage lié aux frottements

dans les filets et la déformation de l'écrou. La phase de contact de l'écrou avec l'interface permet de combler tous les jeux fonctionnels avec l'apparition du couple de frottement sous écrou. Pour finir, la phase de serrage est effective lorsqu'il n'y a plus de jeu à l'interface, où le boulon et l'interface se déforment élastiquement et plastiquement. Les dispersions internes et techniques interviennent à partir du moment où l'écrou est en rotation sur la vis. Les dispersions externes apparaissent seulement lorsque l'écrou arrive en contact avec l'interface. L'enjeu scientifique de cet article concerne la question suivante : la détection du contact nous permettrait-elle de compenser certaines dispersions, avant même d'entamer la phase de serrage ?

### III. LA DETECTION DU CONTACT

L'intérêt principal de la détection du premier contact est de pouvoir s'affranchir de certaines sources de dispersion présentes lors de la phase d'approche. Le premier objectif de cette étude est d'identifier lesquelles sont secondaires.

#### A. La détection en temps réel

Les courbes de la Figure 2 présentent l'évolution de l'angle et du couple de serrage en fonction de la précharge. Malgré une consigne fixée de serrage au couple ou à l'angle, l'allure de chaque début de courbes est vertical correspondant à la phase d'approche. C'est en partie à cause de cette zone d'approche incertaine que la dispersion de la précharge peut être importante. En effet, cette phase d'adaptation est différente pour chaque serrage et génère une grande partie des dispersions évoquées précédemment. Un des problèmes de cette détection est l'impossibilité d'avoir accès à la valeur de la précharge dans un contexte industriel, car elle est intimement liée à l'accostage de l'écrou sur l'interface. Pour contrecarrer cet obstacle, la stratégie est d'exploiter l'augmentation soudaine du couple de serrage par rapport à l'angle de serrage. Ces grandeurs sont accessibles sur n'importe quelle visseuse électronique, ce qui rend cette détection industrialisable.

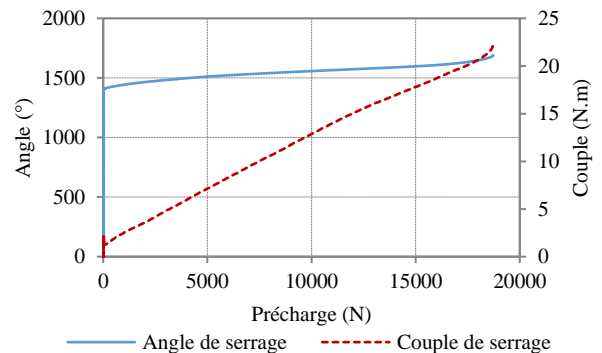


Figure 2. CONSIGNE DE SERRAGE LORS D'UN SERRAGE JUSQU'À RUPTURE

La méthode proposée consiste à calculer en temps réel la dérivée du couple selon l'angle jusqu'à atteindre un seuil limite caractérisant le « contact ». Ce seuil est établi grâce à une base de données expérimentale où la précharge est accessible. La Figure 3 présente les différentes étapes de détection. La courbe bleue correspond à la courbe source du serrage, cependant elle est bruitée à cause des moyens de mesure de l'angle et du couple

de serrage. Réaliser une dérivée numérique sur cette courbe empirerait le bruit de mesure, il est donc nécessaire d'utiliser un filtre passe bas. Le résultat de ce filtrage correspond à la courbe rouge et la dérivée numérique de la courbe source filtrée renvoie la courbe jaune. Avec le bon seuil de détection, la position du point noir sur la courbe source, démontre que la détection correspond bien au début de la phase de serrage et donc l'inflexion du couple par rapport à l'angle de serrage.

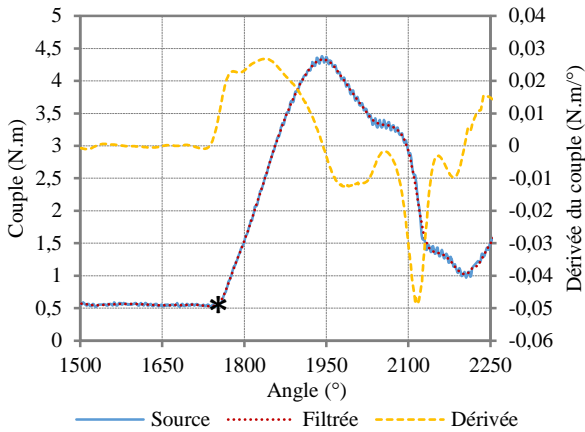


Figure 3. DETECTION DU CONTACT

Néanmoins, un zoom sur la zone d'inflexion du couple par rapport à l'angle de serrage (Figure 4) montre l'ambiguïté entre l'initiation du contact (dès que la courbe filtrée devient croissante) et la fin de la phase de contact (lorsque la courbe filtrée est quasi linéaire durant la phase de serrage). Ceci conduit à une large plage de détection d'environ 0.25 N.m. Cette potentielle variation est non négligeable par rapport à l'ordre de grandeur du couple de contact pour des petits diamètres de fixation (Figure 8).

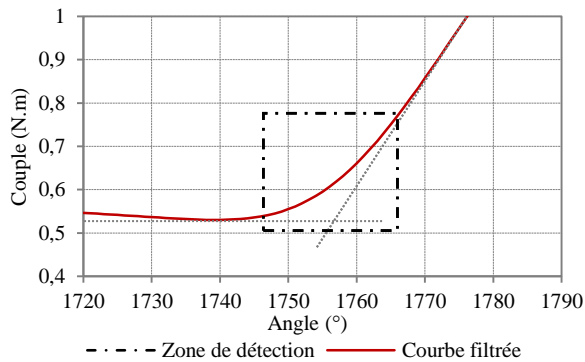


Figure 4. ZONE DE DETECTION

L'axe d'amélioration de cette détection serait d'établir des règles plus robustes et plus cohérentes avec la phase de serrage. De plus, les limites de cette méthode sont liées à la qualité de la dérivée numérique très sensible aux bruits de mesure, mais aussi à l'échantillonnage de points de mesure. Dans certaines conditions la détection du contact peut s'effectuer avant le réel contact, voire même pendant la phase d'accostage. Une confirmation numérique doit alors être mise en œuvre avant toutes conclusions hâtives car celles-ci pourraient être erronées.

### B. Les dispersions détectables

Pour compléter l'étude de l'impact des dispersions internes et techniques sur l'évaluation du point de contact, les résultats de plusieurs campagnes expérimentales ont été analysés. Ces analyses permettront d'évaluer les paramètres influents sur le couple de contact.

**Dispersion du Revêtement :** Cette dispersion peut être importante si les revêtements changent, mais aussi, minime si le fournisseur ou le lot ne sont pas les mêmes. Pour quantifier l'impact sur le couple de contact, 20 essais pour chaque combinaison ont été réalisés avec deux vis de revêtement différents et deux écrous de revêtement différents. Les fixations étudiées sont toutes du même diamètre et proviennent du même fournisseur.

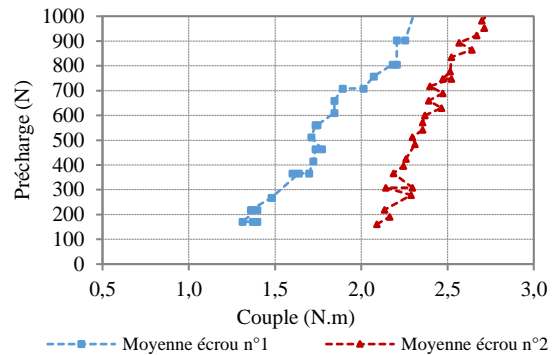


Figure 5. DISPERSION SUR LE REVETEMENT DE L'ECROU

Pour un premier lot d'essai, seul l'écrou est changé (Figure 5). Pour la deuxième campagne d'essai seule la vis est changée (Figure 6). Le contact dans cette campagne expérimentale est considéré atteint dès qu'un seuil de précharge est dépassé. Pour cette étude expérimentale ce seuil est fixé à 150N. Ce choix de valeur englobe les bruits de mesure et la résolution du capteur d'effort utilisé. Le couple de contact correspond à l'abscisse du premier point de la moyenne des courbes des essais de serrage.

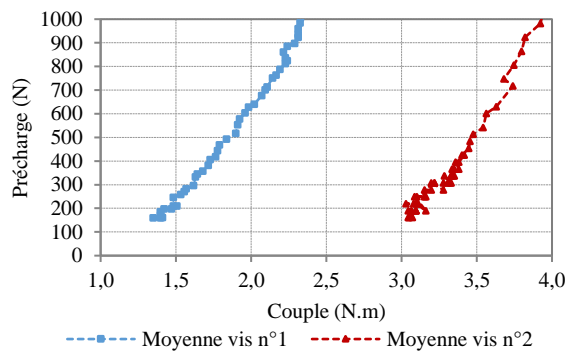


Figure 6. DISPERSION SUR LE REVETEMENT DE LA VIS

Les résultats montrent une grande influence du revêtement sur le couple de contact. Une augmentation de 44.8% (Figure 5) est constatée lorsque le revêtement de l'écrou est changé. De même, une forte augmentation de la dispersion évaluée à 110.3% (Figure 6) est relevée entre les deux types de revêtement de la vis.

**Dispersion géométrique – Tolérance géométrique :** Pour quantifier cette dispersion très générique, liée aux tolérances géométriques des standards de conception, 10 essais expérimentaux ont été réalisés par combinaison, avec 2 fournisseurs de fixations différents, intégrant les mêmes revêtements et le même diamètre. Les résultats (Figure 7) sont moins flagrants que les précédents, mais le constat reste identique. Une augmentation de 10,9% du couple de contact est observée. Au regard de ces résultats, il est possible d'envisager une classification des dispersions.

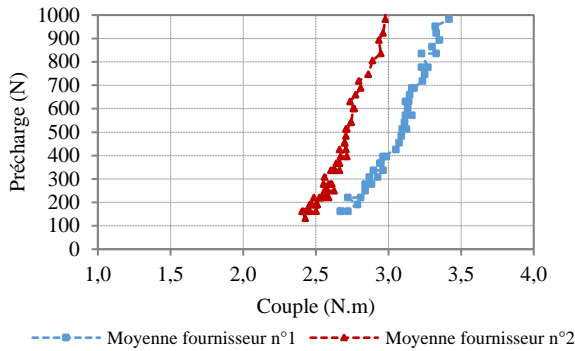


Figure 7. DISPERSION SUR LE TOLERANCEMENT GEOMETRIQUE

**Dispersion géométrique – Ovalisation de l'écrou :** Cette dispersion est la conséquence du procédé d'ovalisation des écrous existant sur les liaisons aéronautiques. L'objectif est de créer un couple de freinage permettant de diminuer les risques de dévissage spontané. Pour cela, l'écrou est déformé plastiquement en écrasant deux ou trois pans de sa partie hexagonale. Parfois, il est possible d'obtenir l'origine des déviations : (i) de la machine-outil, responsable de cette action entre les différents lots, (ii) entre les fournisseurs, en fonction de réglages différents, mais aussi (iii) une variation de l'impact de l'ovalisation, selon le diamètre de l'écrou.

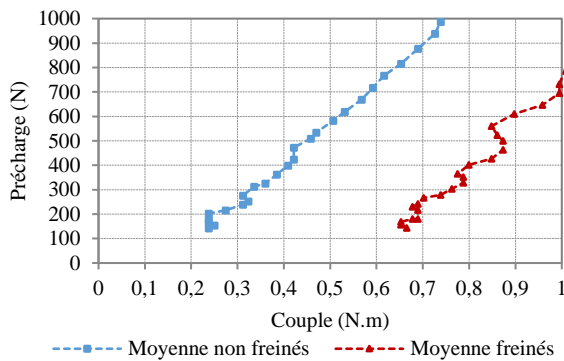


Figure 8. DISPERSION SUR L'OVALISATION DE L'ECROU

Pour observer l'impact de l'ovalisation une campagne expérimentale de 10 essais pour chaque combinaison a été réalisée. Un écrou ovalisé et un écrou non ovalisé ont été utilisés provenant d'un même fournisseur et associant des paramètres identiques (même revêtement et même diamètre nominal).

Les résultats (Figure 8) confirment l'impact de la dispersion de l'ovalisation de l'écrou sur le couple de contact avec une augmentation de 160,4% entre les écrous non ovalisés et les

écrous ovalisés. En effet, l'obtention d'un couple de desserrage ne peut pas exister sans un couple résiduel de freinage de serrage.

**Outils – Vitesse de serrage :** La vitesse de serrage est la seule dispersion technique que l'on peut indirectement observer. Pour déterminer son influence sur le couple de contact, une campagne expérimentale de 5 essais par combinaison a été réalisée avec 5 vitesses de serrage différentes et des vis et écrous identiques. L'enjeu lié au changement de la vitesse de serrage est l'introduction des phénomènes dynamiques dans le processus de serrage, comme l'inertie. De plus, les fortes vitesses de glissement dans les filets et sous l'écrou combinées à d'importantes pressions peuvent remettre en question les hypothèses de Coulomb et donc modifier le comportement lié au frottement, lors du serrage.

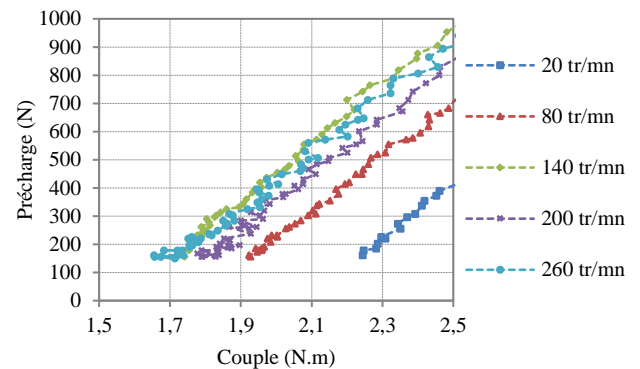


Figure 9. DISPERSION SUR LA VITESSE DE SERRAGE

Les résultats (Figure 9) confirment l'impact de la vitesse de serrage sur le couple de contact. Une augmentation de 32,4% est constatée entre une vitesse de serrage à 260 tr/mn et une vitesse de serrage à 20 tr/mn. D'autre part, plus la vitesse de serrage est augmentée plus elle va tendre vers un couple de contact limite.

À ce stade, le lien entre le couple de contact et toutes les dispersions présentées dans cette partie est irréfutable. Cependant, les travaux de Dols [9] concluent que pour détecter distinctement des phénomènes lors du serrage, dans son cas le jeu et les bavures à l'interface, il était parfois nécessaire d'avoir plusieurs paramètres d'acquisitions. Le couple de serrage seul n'est pas suffisant. Ce constat est confirmé dans ces travaux. L'accumulation de plusieurs phénomènes dans la phase d'approche de l'écrou influence la variation du couple de contact. Cependant, l'intérêt de la méthode proposée est d'être conscient de l'impact que peut avoir la dispersion, à l'échelle locale, et d'être capable de la gérer globalement. Plus précisément, la méthode de détection proposée ne peut pas quantifier précisément la dispersion de chaque source présentée dans le Tableau 1. Cependant, elle est capable de quantifier le cumul de plusieurs dispersions et donc de les compenser. Pour vérifier cette analyse, une étude de la dispersion de la précharge est réalisée entre un couple de serrage donné et un couple adaptatif prenant en compte le couple de contact.

#### IV. APPLICATION A UN OUTIL THEORIQUE

L'objectif dans cette partie est de montrer analytiquement les performances qu'un outil adaptatif pourrait apporter en termes de précision de la précharge dans un assemblage boulonné.

### A. Consigne théorique de serrage

La formule la plus utilisée pour représenter le serrage au couple est la formule linéaire de Kellerman et Klein [10] voir éq (1). Cette formule ne prend pas en compte la longueur de la vis, les matériaux intervenant dans le boulon et les matériaux de l'interface. De ce fait, cette formule reste très généraliste, car comme démontré précédemment le comportement d'un d'assemblage boulonné, lors du serrage dépend de nombreux paramètres. Cependant, la phase de serrage étant relativement linéaire cela permettra d'obtenir de meilleurs résultats lors de l'ajout du couple de contact.

$$C = \left( \frac{p}{2\pi} + \frac{\mu_f \cdot r_f}{\cos\beta} + \mu_e \cdot r_e \right) P \quad (1)$$

$p, \beta$  : Pas et angle des filets

$\mu_e, \mu_f$  : Coefficient de frottement sous écrou et dans les filets

$r_e, r_f$  : Rayon moyen sous écrou et des filets

$C, P$  : Le couple de serrage et la précharge

Les courbes (Figure 10) serviront de socle à l'analyse faite dans cette partie. Sur 20 essais de serrage jusqu'à rupture avec des pièces identiques, seulement 3 sont représentés pour assurer une bonne lisibilité du graphique, ainsi que la consigne théorique suivant éq. (1).

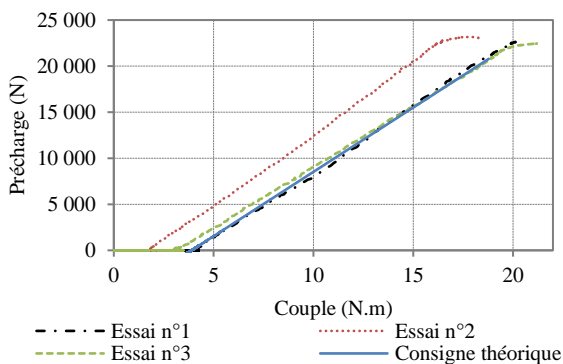


Figure 10. ESSAIS DE SERRAGE JUSQU'À RUPTURE

Même si ces 20 essais ont été réalisés avec des conditions identiques on distingue déjà une grande variation du couple de contact. La courbe analytique est issue de la formule de Kellerman et Klein avec les paramètres géométriques réels et les coefficients de frottements estimés de sorte à se rapprocher le plus possible de la raideur observée expérimentalement durant la phase de serrage. Les résultats du Tableau 2 rassemblent les valeurs de précharge à un couple donné, 10 N.m, en considérant la précharge théorique comme consigne de serrage. Deux cas sont présentés, le premier où la courbe théorique a une ordonnée à l'origine nulle, autrement dit, le moindre effort de couple sera transféré à la vis en précharge. Au vu du ratio entre la précharge expérimental et l'objectif de serrage analytique les résultats sont très mauvais, une précharge si basse peut remettre en question l'intégrité de l'assemblage boulonné. Inévitablement cela est dû à l'ovalisation de l'écrou qui apporte un couple de freinage avant même que l'effort de couple ne puisse être transformé en précharge. C'est pourquoi dans le deuxième cas un offset,  $C_f$ , a été rajouté éq. (2) égal à la moyenne des couples de contact des essais pour simuler un couple de freinage constant et connu. Les précharges expérimentales sont plus centrées par rapport à la consigne et les écarts sont inférieurs au premier cas. Ainsi, un

serrage en prenant en compte un couple de contact est bien plus précis et moins dispersif par rapport à un serrage conventionnel au couple.

Données	Précharge (N) sans couple de freinage		Précharge (N) avec couple de freinage	
	Valeur	Précision (%)	Valeur	Précision (%)
Essai n°1	7 927	56,70 %	7 927	79,89 %
Essai n°2	12 410	88,76 %	12 410	125,08 %
Essai n°3	9 128	65,29 %	9 128	92,00 %
Analytique	15 970	100,00%	9 922	100,00%

Tableau 2. VALEUR DE LA PRECHARGE A ISOCOUPLE

### B. Ajout de la détection dans la consigne de serrage

Dans la quête du gain de précision, la maîtrise de la détection du contact est primordiale. A partir de l'équation éq. (2) et de la méthode de détection présentée précédemment, il est possible d'évaluer un offset de couple pour chaque processus de serrage. Ainsi, chaque serrage possèdera sa propre courbe théorique et donc sa propre consigne de serrage.

$$P = \frac{(C - C_f)}{\left( \frac{p}{2\pi} + \frac{\mu_f \cdot r_f}{\cos\beta} + \mu_e \cdot r_e \right)} \quad (2)$$

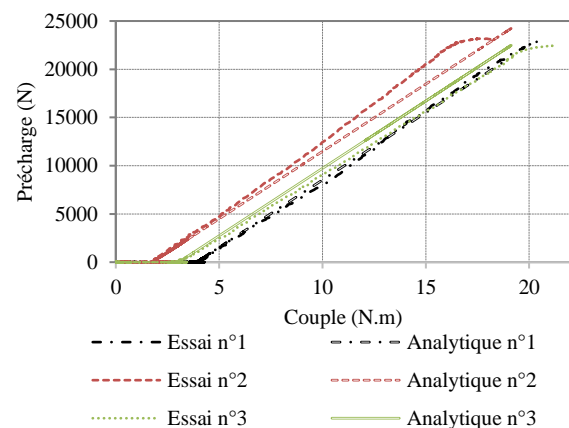


Figure 11. ESSAIS DE SERRAGE JUSQU'À RUPTURE

La Figure 11 fait apparaître chacune des courbes théoriques pour chacun des essais. A ce stade, les coefficients directeurs des consignes sont égaux puisque les paramètres de l'équation éq. (2) sont liés à la géométrie et aux revêtements des 3 boulons identiques.

Qualitativement puis quantitativement grâce aux résultats du Tableau 3, l'augmentation de la précision en utilisant un offset adaptatif dans la formule de Kellerman et Klein est considérable.

Données	Précharge expérimentale (N)	Précharge théorique (N)	Erreur (%)
Essai n°1	7 927	8 534	7,66
Essai n°2	12 410	11 485	7,45
Essai n°3	9 128	9 695	6,21

Tableau 3. VALEUR DE LA PRECHARGE A ISOCOUPLE AVEC DETECTION DU COUPLE DE CONTACT

### V. CONCLUSIONS

La détection du point de contact permet d'utiliser un évènement lors du processus de serrage commun à n'importe

quelle fixation. Cela permet d'appréhender au maximum la phase d'approche et de mieux contrôler la phase de serrage. Ainsi, la précision de la précharge de l'assemblage boulonné peut être grandement améliorée et donc accéder à un niveau de confiance élevé dans la valeur de serrage induite dans la liaison. Avec un contrôle en temps réel du couple et de l'angle de serrage, il est possible d'envisager une acquisition des déviations des paramètres couple-angle. L'analyse temporelle peut apporter une véritable plus-value sur le contrôle de la précharge, mais aussi dans les phases de maintenance, dans une démarche prospective. De plus, une adaptation des paramètres de la relation de Kellerman et Klein, à chaque étape du serrage, peut également être envisagée. Cette stratégie permettrait d'obtenir une raideur de serrage plus fidèle pour envisager une installation plus précise de la précharge visée.

## VI. REFERENCES

- [1] T. BENHADDOU. "Effect of axial preload on durability of aerospace fastened joints", International Journal of Mechanical Sciences, 2018.
- [2] A. BOUZI-IKER. "Efficient assembly of bolted joints under external loads using numerical fem", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. N°142143, 2018, pp. 575-582.
- [3] M. SEVOSTIANOV. "Contact of rough surfaces : A simple model for elasticity, conductivity and cross-property connections", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. N°56, 2008, pp. 1380-1400.
- [4] V. RAFIK. "Dévissage d'un assemblage aéronautique sous sollicitations transverses", PhD thesis, 2019.
- [5] X. SUN. "Bolt preload measurement based on the acoustoelastic effect using smart piezoelectric bolt", Smart Materials and Structures 28, 2019.
- [6] Q. KONG. "Smart washer a piezoceramic-based transducer to monitor looseness of bolted connection" Smart Materials and Structures, Vol. N°26, 2017.
- [7] VDI Richtlinien VDI 2230. Systematic calculation of highly stressed bolted joints. Part 1: Joints with one cylindrical bolt (2015), 1-182, ICS 21.060.10
- [8] NF E25-030-2, Fasteners - Threaded connections with ISO metric thread - Part 2: Design rules for tensile loaded bolted joints - Complete procedure -, Afnor France (2014), 1-105, [Online].
- [9] S. DOLS. "Développement d'une nouvelle méthode de serrage intelligente pour le contrôle des assemblages boulonnés", PhD thesis, 2016.
- [10] R. KELLERMAN. "Untersuchungen über den einfluß der reibung auf vorspannung und anzugsmoment von schraubenverbindungen" Konstruktion, SpringerVerlag, Vol. N°2, 1955.