



HAL
open science

Influence des jeux et des désalignements sur un assemblage simple cisaillement

Guillaume Pichon, Alain Daidié, Eric Paroissien, Audrey Benaben

► **To cite this version:**

Guillaume Pichon, Alain Daidié, Eric Paroissien, Audrey Benaben. Influence des jeux et des désalignements sur un assemblage simple cisaillement. 17ème colloque national S-mart AIP-PRIMECA, Université Polytechnique Hauts-de-France [UPHF], Mar 2021, LAVAL VIRTUAL WORLD, France. hal-03296119

HAL Id: hal-03296119

<https://hal.science/hal-03296119>

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.

Influence des jeux et des désalignements sur un assemblage simple cisaillement

Assemblage Hole to Hole d'une structure aéronautique

Guillaume Pichon
AIRBUS Opérations S.A.S.
Institut Clément Ader, UMR CNRS 5312,
INSA/UPS/ISAE-SUPAERO/Mines Albi
Toulouse (France)
gpichon@insa-toulouse.fr

Alain Daidié
Institut Clément Ader, UMR CNRS 5312,
INSA/UPS/ISAE-SUPAERO/Mines Albi
Toulouse (France)
alain.daidie@insa-toulouse.fr

Eric Paroissien
Institut Clément Ader, UMR CNRS 5312,
INSA/UPS/ISAE-SUPAERO/Mines Albi
Toulouse (France)
eric.paroissien@isae-supero.fr

Audrey Benaben
AIRBUS Opérations S.A.S.
Toulouse (France)
audrey.benaben@airbus.com

Résumé— Le but principal du travail présenté ici est d'étudier l'effet du jeu et des désalignements des trous des fixations sur le comportement jusqu'à rupture en statique des assemblages aéronautiques. A cet effet, une approche expérimentale est adoptée pour évaluer l'influence de ces paramètres. Dans l'approche expérimentale, des éprouvettes en titane assemblées en simple cisaillement avec deux boulons sertis sont testées sous chargement axial quasi-statique. Plusieurs configurations de désalignement sont établies, pour quantifier la résistance mécanique des assemblages. Les résultats montrent une diminution importante des performances dans la configuration avec des grands désalignements. Si le jeu des trous n'a pas d'influence significative, une réduction importante de la résistance est mesurée pour des grands désalignements.

Mots-clés — essai statique, hole-to-hole, désalignement, assemblage boulonné

I. INTRODUCTION

Bien que le secteur aéronautique ait été gravement touché par la crise sanitaire mondiale liée au COVID-19, les besoins en termes d'innovation sont toujours forts. La compétitivité a même été renforcée par l'intérêt grandissant des états et du grand public pour les challenges écologiques modernes.

Dans le cadre de ses activités de recherche, AIRBUS s'intéresse aux nouvelles méthodes d'assemblages des structures aéronautiques. En effet le procédé d'assemblage classique, bien que maîtrisé et optimisé, présente plusieurs inconvénients majeurs le rendant moins compétitif. L'un de ces inconvénients est la lourdeur du processus d'assemblage final avec de nombreuses opérations telles que les différentes phases de repositionnement des grandes pièces structurales les unes en faces des autres.

Le besoin en outil de perçage dans le processus d'assemblage est un facteur important dans le calcul des coûts récurrents. Afin de fortement réduire ces coûts, **Bloem [1]** introduit un nouveau processus d'assemblage appelé *hole to hole*.

Le principe à la base de ce nouveau processus est de supprimer les opérations de perçage dans la phase d'assemblage final. Ainsi les pièces élémentaires sont percées individuellement en amont sur leur chaîne de production. Dès lors la phase d'assemblage final consiste uniquement à la mise en position des pièces et à l'installation des fixations définitives. Bien que cette nouvelle méthodologie soit très intéressante d'un point de vue économique et vis-à-vis du temps gagné en phase d'assemblage, elle présente un risque majeur lors du regroupement des pièces. En effet, les trous des fixations peuvent être légèrement décalés de leurs positions nominales. Les positions relatives n'étant pas parfaitement respectées les fixations ne peuvent être correctement installées dans les alésages et l'assemblage n'est plus possible. Afin d'y remédier, la solution technique la plus appropriée est d'augmenter les diamètres des alésages. Ainsi une fois les pièces mises en position, l'installation des fixations est néanmoins possible malgré les potentiels désalignements.

La problématique essentielle de ce nouveau processus d'assemblage est alors le tolérancement des trous de perçage. Il existe plusieurs travaux de recherche à ce sujet, notamment les travaux de **Lecomte [2]**, qui s'appuient sur une approche probabiliste couplée à un modèle analytique afin de prédire les niveaux de chargement d'un assemblage en prenant en compte les erreurs de positions des trous de fixations.

A l'heure de l'industrie 4.0 et du tout numérique, les approches assistées par ordinateur sur les sujets de

tolérancement sont également répandues dans la littérature. On trouve notamment les travaux de Xu [3], de Liu [4] et de Askri [5,6]. Ces travaux présentent des approches probabilistes basées sur des calculs statistiques couplés à des modèles numériques éléments finis (EF) permettant d'obtenir une haute fidélité de la représentation des phénomènes physiques en jeu dans les assemblages.

Ces différents travaux mettent en avant les risques liés à l'incertitude de position relative des trous des fixations sur le niveau de chargement de chaque fixation au sein d'un assemblage. Or il est difficile de trouver dans la littérature des publications faisant référence à des campagnes expérimentales prenant en compte les paramètres d'assemblage que sont les jeux radiaux et les désalignements. On trouve néanmoins les travaux de M.A. McCarthy [7] sur l'effet des jeux radiaux sur les assemblages en matériaux composite. De plus, ils ne prennent pas en compte les potentiels désalignements liés à au processus d'assemblage *hole to hole*.

Afin d'appliquer ce processus d'assemblage, l'influence de du jeu et du désalignement sur les performances mécaniques doit être étudiée. Des essais physiques permettraient non seulement de quantifier les abattements mécaniques supposés mais également de comprendre les mécanismes physiques qui mènent à ces abattements. Tels sont donc les objectifs de la campagne expérimentale présentée dans cet article.

La structure étudiée en particulier dans cet article est le mât réacteur, les éprouvettes sont donc constituées de titane un matériau à la fois très résistant d'un point de vue mécanique mais également très adaptée aux larges variations thermiques de cette zone structurelle. Il s'agit en particulier du titane Ti-6Al-4V β , un métal développé pour l'aéronautique.

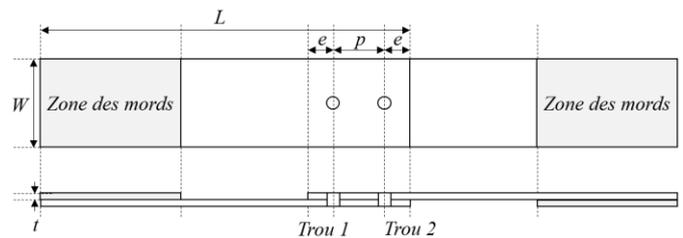


Figure 1. GEOMETRIE DES EPROUVETTES

Dimensions	L	e	p	W	t
Valeurs en mm	184,3	12,7	25,4	44,45	3,175

Tableau 1. DIMENSIONS DES EPROUVETTES

Les paramètres principaux de l'étude sont naturellement les diamètres et les désalignements des trous de fixations. Un total de sept configurations ont été établies pour cette campagne. Ces différentes configurations sont présentées à l'aide du Tableau 2. L'orientation ainsi que la valeur des désalignements sont illustrées en Figure 2. Le paramètre α permet d'identifier les positions des trous de fixation sur les plaques élémentaires, ainsi que les désalignements relatifs.

La configuration identifiée A0 représente la référence de cette campagne. En effet, le jeu radial est compris entre 8 et 34 centièmes permettant un assemblage à la main des fixations. Les configurations B5, C5 et F5 présentent différents types de désalignement dans le sens de chargement des éprouvettes tandis que les configurations D5 et E5 présentent des désalignements orthogonaux au sens de chargement. Les coupons métalliques sont usinés individuellement afin d'être représentatifs du processus d'assemblage testé. Lors de la phase d'assemblage les deux fixations sont introduites et maintenues en position avant d'être serties pour éviter les erreurs de montage. On fait la remarque ici que les têtes de fixation sont installées du même côté, celui du substrat bleu selon la Figure 2.

ID	Type	d fixation (mm)	\varnothing perçage (mm)	α (mm)
A0	A	6,325 \pm 0,013	6,382 \pm 0,01	0
A5	A			
B5	B		6,882 \pm 0,01	0,5
C5	C			
D5	D			
E5	E			
F5	F			

Tableau 2. DIMENSIONS DES EPROUVETTES

II. CAMPAGNE EXPERIMENTALE

A. Description des éprouvettes

La géométrie des éprouvettes utilisées dans cette campagne est présentée en Figure 1, les dimensions sont données par le Tableau 1. Le diamètre des fixations est de $d=6,35\text{mm}$, cette grandeur pilote le reste des dimensions. Les ratios de largeur, de distance au bord, de pas entre les boulons et d'épaisseur par rapport au diamètre des fixations sont $W/d=7$, $e/d=2$, $p/d=4$, $t/d=0,5$ respectivement

Les fixations choisies pour cette campagne d'essais sont des fixations serties en titane à têtes protubérantes, de la référence ABS0998-4 associés à des bagues ABS0999-4. Le choix de ces fixations est lié à la faible variation de la tension installée caractéristique de ce type de fixation. En effet, les fixations filetées sont généralement installées au couple mais les phénomènes de friction dans les filets et sous écrou sont générateurs d'une incertitude importante quant à la pré tension réellement installée

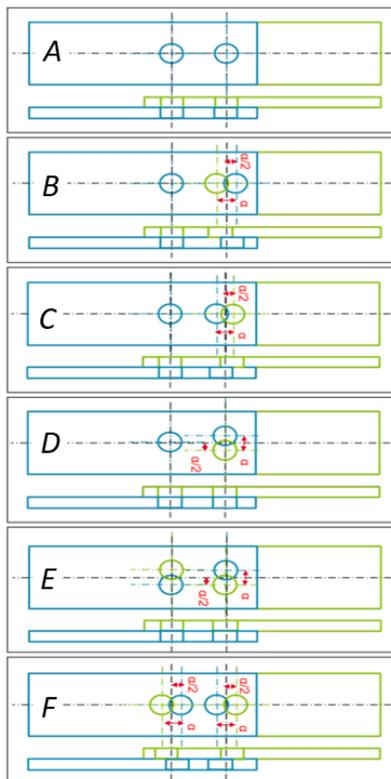


Figure 2. CONFIGURATIONS DES DESALIGNEMENTS

B. Description des essais

Lors des essais de cette campagne, les éprouvettes sont chargées en déplacement imposé (0.01 mm/s), jusqu'à rupture. La machine utilisée ici est une INSTRON 8501 (Figure 3) de capacité 100kN. Pour chaque configuration, trois éprouvettes sont testées. Au cours des montées en charge le déplacement imposé aux éprouvettes ainsi que l'effort déployé par le vérin de la machine de traction sont enregistrés avec une fréquence de 5Hz. Sur une des trois éprouvettes de chaque configuration un mouchoir a préalablement été peint, ainsi un suivi par stéréocorrélation d'image est possible. Celui-ci permet d'obtenir les champs de déplacement et de déformation sur la surface extérieure des éprouvettes coté têtes de fixation, Figure 5.

III. RESULTATS

A. Courbe effort déplacement

Les premiers résultats observés sont les courbes effort déplacement, Figures 5 à 12. Celles-ci permettent d'analyser le comportement de l'assemblage lors des montées en charge. L'analyse menée ici est purement qualitative, puisque les efforts présentés ont été normés par la valeur maximale enregistrée lors des essais de référence (A0). L'analyse configuration par configuration des courbes montre 4 types de comportement, chacun décrit ici de manière chronologique.

La phase 1 est une phase de transfert d'effort par adhérence. Il s'agit d'une zone de montée en charge linéaire de l'éprouvette. L'effort est transmis par friction à l'interface des deux coupons métalliques grâce à la tension installée par les

fixations. On remarque que cette phase est similaire pour chacune des configurations, les paramètres majeurs de cette étude n'ont donc aucun impact sur la raideur de l'éprouvette dans cette phase de chargement.

La phase 2 est une phase de glissement. Une fois l'effort d'adhérence limite vaincu la friction ne suffit plus à transmettre l'effort global. Un glissement est alors occasionné entre les deux coupons de l'éprouvette. On observe alors un palier d'effort et une variation important du déplacement. Si l'effort d'adhérence limite est tout à fait répétitif d'une configuration à l'autre, 12% de la valeur maximale normative, la valeur du déplacement est dépendant non seulement de la configuration mais également du montage l'éprouvette. On remarque ainsi des écarts de déplacement entre des éprouvettes de même configuration. Les paramètres que sont les jeux ainsi que les positions relatives des trous ont un impact direct sur la valeur du glissement. On remarque que les configurations A0, C5 et F5 présentent une phase de glissement avec un déplacement faible (0.1 à 0.2 mm). Il s'agit des configurations où au moins une des fixations est directement en contact avec l'alésage limitant ainsi la valeur du déplacement lors du glissement. Au contraire, les configurations A5, B5 et E5 présentent une phase de glissement avec un déplacement important lié au jeu radial et à la direction des désalignements.

La phase 3 est une phase de transfert d'effort par matage linéaire. Suite au glissement relatif des coupons, au minimum une des deux fixations de l'assemblage est en contact avec l'alésage. L'effort est alors transmis par matage du fut de fixation sur l'alésage des coupons. Cette phase de chargement est caractérisée par une raideur définie comme le rapport de l'effort sur le déplacement. On observe que les configurations A0, A5, D5 et E5 ont sensiblement les mêmes raideurs environ $0,64 \text{ mm}^{-1}$. En effet, les courbes effort déplacement de ces configurations sont parallèles dans ces zones. En revanche les configurations B5, C5 et F5 semblent présenter une raideur plus faible de l'ordre de $0,40 \text{ mm}^{-1}$.

La phase 4 est une phase de transfert d'effort par matage non linéaire. Les courbes montrent une forte chute de raideur. Cette chute semble être liée à la plastification des fixations. En effet l'effort évolue faiblement par la suite tandis que le déplacement augmente fortement (1 à 1,5mm). La fin de cette phase se traduit par la rupture des fixations et donc la fin de l'essai. Dans le cas de la configuration F5, la rupture légèrement différente est expliquée ci-après.

Dans le cas des configurations B5 et C5, il est difficile de distinguer les phases 3 et 4 sur les courbes effort déplacement. En effet, on observe des chutes et des augmentations de la raideur de ces assemblages. Bien que la description phase par phase des montées en charge permet de comprendre les phénomènes observés dans la plupart des configurations certains phénomènes restent inexpliqués, notamment concernant les configurations B5, C5 et F5.

La différence de raideur dans la phase de matage linéaire viendrait donc des désalignements particuliers de ces configurations. Suite au glissement, une seule des deux fixations serait en contact avec les alésages des coupons métalliques et reprendrait alors tous les efforts de l'assemblage. Les résultats du suivi par corrélation d'images permettent de

confirmer cette théorie. La Figure 5 montre les déformations ϵ_{xx} (direction de chargement) au cours de la montée en charge. Les images choisies sont à iso-efforts (26kN). Sur la configuration A5, les déformations semblent réparties sur les deux fixations. En revanche, sur les configurations C5 et F5, les déformations ne sont visibles que sur la fixation du trou n°2 (fixation haute sur l'image). De même sur la configuration B5, les déformations sont également réparties autour d'une seule fixation, la fixation basse.

B. Mode de rupture

Au cours des 21 essais de montée en charge quasi statique, le même mode de rupture a été observé, il s'agit du cisaillement des fixations. L'analyse des profils de rupture montre des stries parallèles au sens de chargement, occasionnées lors de la rupture des fixations (Figure 4). Les plans de rupture se situent au niveau du plan médian des éprouvettes, soit la zone de cisaillement maximal de la fixation. On remarque que pour ce type d'assemblage, le jeu radial n'a pas d'impact sur le mode de rupture, de même que les désalignements.

Les ruptures des deux fixations sont simultanées pour l'intégralité des configurations testées à l'exception de la configuration F5 pour laquelle la fixation du trou n° 2 (Figure 1) casse dans en premier temps puis l'essai continu jusqu'à la rupture de la seconde fixation. Il s'agit du phénomène de déboutonnage décrit par **Guillot [8]**. Ces observations au cours des essais permettent de comprendre l'allure des courbes en Figure 11. La première chute d'effort est liée à la rupture de la première fixation tandis que la deuxième et dernière chute correspondent à la rupture de la seconde.

Une très faible ovalisation des alésages est visible montrant les zones fortement sollicitées par matage au cours des montées en charge.



Figure 3. PHOTO D'UNE FIXATION CISAILLEE PENDANT UN ESSAI

C. Effort maximal transmis par l'assemblage

L'analyse des efforts machine permet d'observer l'indicateur de performance mécanique principal, c'est-à-dire l'effort maximal transmis par l'assemblage avant sa rupture. Les valeurs d'effort ont été normées par la valeur de l'effort maximal enregistré au cours des essais sur les éprouvettes de référence A0. Le Tableau 3 présente ces résultats. On observe en particulier que les configurations avec des désalignements perpendiculaires au sens de chargement présentent également un effort maximal de 1 tout comme la

configuration A5. Le jeu et ce type de désalignement ne semblent donc pas provoquer d'abatement de cette caractéristique mécanique. En revanche, les configurations B5 et C5 présente un abatement de l'ordre de 5% tandis que la configuration F5 présente un abatement de 36%. Il s'agit ici du pire cas de cette campagne expérimentale. Les désalignements de direction parallèle au sens de chargement ont donc un impact important sur l'effort maximal transmissible par l'assemblage

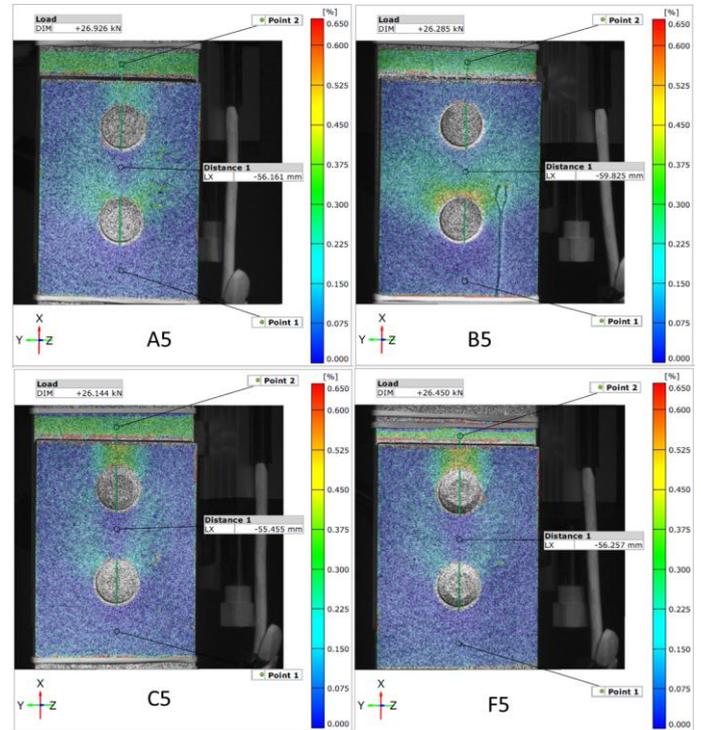


Figure 4. DEFORMATION ϵ_{xx} (SENS DE CHARGEMENT) DES CONFIGURATIONS A5, B5, C5 ET D5

Configuration	A0	A5	B5	C5	D5	E5	F5
Effort max normé à rupture	1	1	0,95	0,94	1	1	0,64

Tableau 3. EFFORTS MAX A RUPTURE NORMES

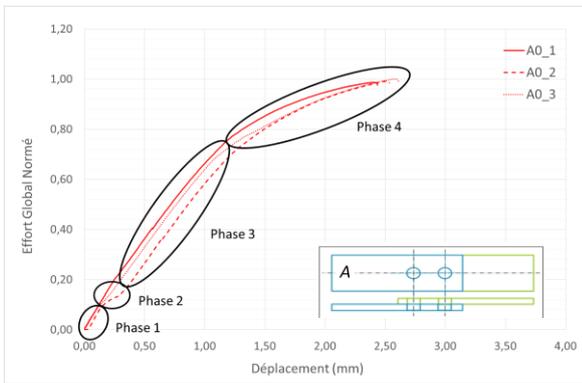


Figure 5. COURBE EFFORT DEPLACEMENT A0

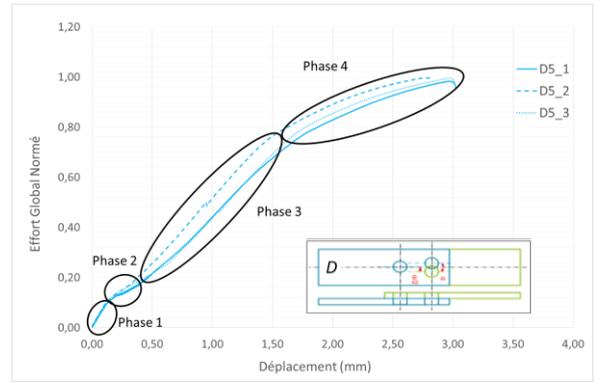


Figure 9. COURBE EFFORT DEPLACEMENT D5

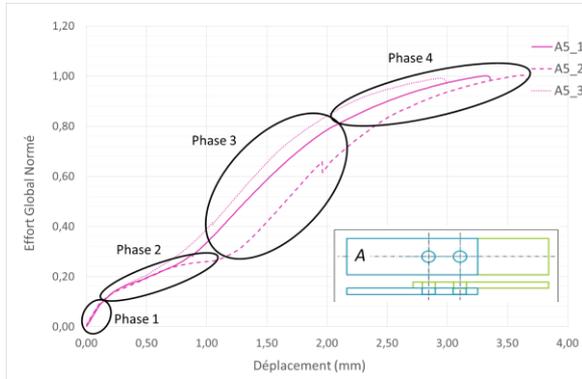


Figure 6. COURBE EFFORT DEPLACEMENT A5

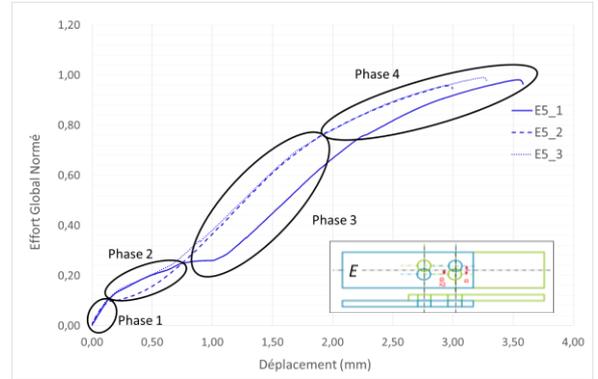


Figure 10. COURBE EFFORT DEPLACEMENT E5

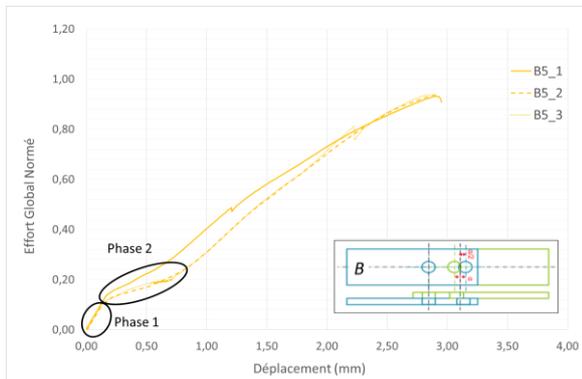


Figure 7. COURBE EFFORT DEPLACEMENT B5

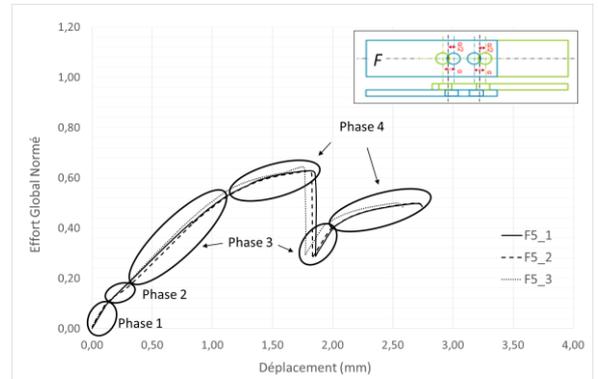


Figure 11. COURBE EFFORT DEPLACEMENT F5

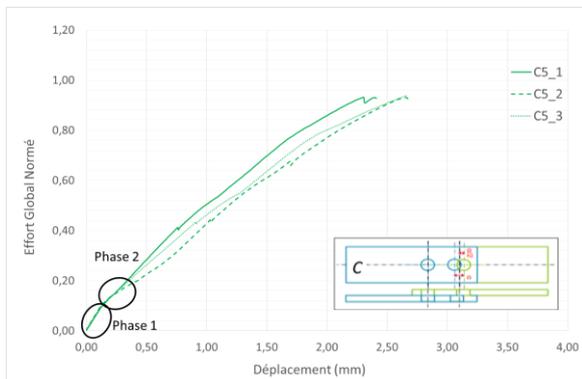


Figure 8. COURBE EFFORT DEPLACEMENT C5

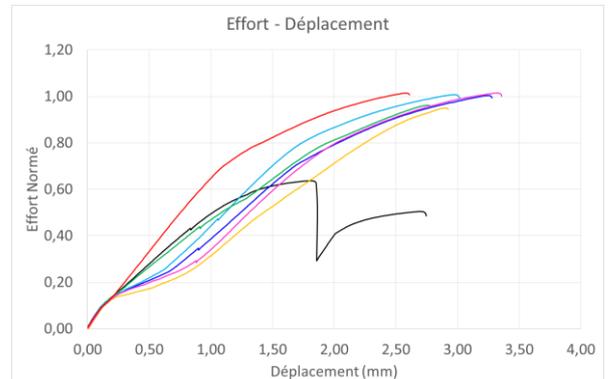


Figure 12. COURBE EFFORT DEPLACEMENT GLOBAL

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail montre l'influence des jeux radiaux et des désalignements sur les performances mécaniques d'un assemblage boulonné sollicité en simple cisaillement.

Ni l'augmentation du jeu radial ni les désalignements perpendiculaires au sens de chargement n'ont un impact sur les performances de l'assemblage en termes d'effort maximum avant rupture. En revanche les désalignements parallèles au sens de chargement ont un impact majeur. En effet, le chargement de l'assemblage en est fortement affecté. Dans ces configurations la raideur de l'assemblage est plus faible ce qui occasionne un déplacement plus important lors de la montée en charge. De plus, les seuils de plastification sont atteints à des niveaux de chargement globaux plus faibles d'où les abattements de performance mécanique observés.

Si ce type de comportement a pu être observé pour des assemblages en titane dont le mode de rupture est le cisaillement de fixation. Il n'est pas possible d'affirmer que les mêmes comportements seront observables pour des assemblages ayant des modes de ruptures différents. Les matériaux des pièces assemblées ainsi que ceux des fixations sont donc des paramètres majeurs à investiguer pour l'application d'assemblage *hole to hole*.

La suite de ce projet de recherche sera donc de compléter la campagne expérimentale afin de comprendre l'impact des désalignements quel que soit l'assemblage aéronautique testé. Le développement d'un modèle numérique permettrait de tester beaucoup de configurations et ainsi réduire fortement les coûts des essais physiques.

L'impact des jeux et des sur la durée de vie des assemblages doit également être déterminé. En effet des essais de fatigue prenant en compte ces paramètres doivent également être menés dans la suite du projet.

V. RECONNAISSANCES

Le travail présenté dans cet article fait partie intégrante d'un projet de recherche interne à AIRBUS OPERATIONS. Remerciements à l'Agence Nationale Recherche Technologie.

VI. REFERENCES

- [1] J. BLOEM. "Developments in Hole-to-Hole Assembly", SAE Transactions, Vol. 116, Section 1: JOURNAL OF AEROSPACE (2007), pp. 1087-1097.
- [2] J. LECOMTE et al. "An analytical model for the prediction of load distribution in multi-bolt composite joints including hole-location errors", Composite structures, Vol 117, (2014), pp 354-361, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.06.040>.
- [3] S. XU et al. "Geometric computation and optimization on tolerance dimensioning", Computer-Aided Design, Vol 46, (2014), pp129-137, <https://doi.org/10.1016/j.cad.2013.08.025>.
- [4] F. LIU et al. "Probabilistic bolt load distribution analysis of composite single-lap multi-bolt joints considering random bolt-hole clearances and tightening torques", Composite Structures, Vol 194, (2018), pp 12-20, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.100>.

- [5] R. ASKRI et al. "Effect of hole-location error on the strength of fastened multi-material joints", Procedia CIRP, Vol 43,(2016), pp 292-296, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.040>.
- [6] R. ASKRI et al. "Tolerance synthesis of fastened metal-composite joints based on probabilistic and worst-case approaches", Computer-Aided Design, Vol 100, (2018), pp39-51, <https://doi.org/10.1016/j.cad.2018.02.008>.
- [7] M. A. MCCARTHY et al. "An Experimental Study of Bolt-Hole Clearance Effects in Single-lap, Multibolt Composite Joints", Journal of COMPOSITE MATERIALS, Vol. 39, No. 9,(2005), doi: 10.1177/0021998305048157
- [8] J. GUILLOT. "Calcul des assemblages vissés – Assemblages de pièces de planes de faibles épaisseurs. Partie 1", Editions T.I., bm5565, <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/assemblages-et-fixations-mecaniques-42177210/calcul-des-assemblages-visses-bm5565/>