

# Étude numérique de l'influence de la géométrie et du jeu sur le comportement en matage d'un composite PRFC

## *Numerical study of the influence of geometry and clearance on the behavior under bearing load of a CFRP composite*

T. Furon-Faucher<sup>1,2</sup>, F.-X. Irisarri<sup>1</sup>, M. Kaminski<sup>1</sup>, M. Hirsekorn<sup>1</sup>, S. Garcia Rodriguez<sup>2</sup>

1 : DMAS, ONERA, Université Paris Saclay  
F-92322 Châtillon France  
e-mail : thais.furon-faucher@onera.fr

2 : Airbus Operations SAS  
316 Route de Bayonne, 31027 Toulouse  
e-mail : santiago.garcia-rodriguez@airbus.com

### Résumé

Dans le cadre de la mise en œuvre industrielle d'un nouveau procédé d'assemblage, le procédé *hole-to-hole*, on évalue numériquement le comportement en matage d'un matériau composite selon différentes configurations d'étude préliminaires. L'objectif est de préparer numériquement une campagne expérimentale. Il s'agit en particulier de valider deux configurations simplifiées d'étude du matage, par rapport à une configuration plus réaliste, ainsi que d'étudier l'influence du jeu. Les simulations sont réalisées dans le logiciel Abaqus, avec le modèle d'endommagement progressif multi-échelle OPFM. Les simulations réalisées valident les configurations proposées qui présentent des scénarios d'endommagement en matage cohérents, malgré des effets géométriques et des effets de bord libres différents. L'augmentation du jeu au niveau de l'assemblage augmente la contrainte en compression dans les plis à 0° face au pion, diminuant ainsi la tenue de l'assemblage, et réduit sa raideur globale.

### Abstract

As part of the industrial implementation of a new assembly process, the hole-to-hole process, we are numerically evaluating the bearing behavior of a composite material according to different preliminary study configurations. The goal is to prepare numerically for an experimental campaign. In particular, we want to validate two simplified bearing configurations against a more realistic one, and to study the influence of clearance. The simulations were carried out in Abaqus software, using the OPFM multi-scale progressive damage model. The simulations validate the proposed configurations, which present consistent bearing damage scenarios, despite different geometric and free edge effects. Increased joint clearance increases the compressive stress in the 0° plies facing the pin, thereby reducing the joint's strength and overall stiffness.

**Mots Clés :** *hole-to-hole*, assemblage, jeu, matage, endommagement

**Keywords:** hole-to-hole, assembly, clearance, bearing, damage

## 1. Introduction

Avec l'augmentation de la cadence de production dans le milieu aéronautique, de nouvelles solutions techniques doivent être envisagées. Parmi ces solutions, le procédé *hole-to-hole* semble prometteur. Ce procédé vise à éviter les opérations de contreperçage sur les chaînes d'assemblage en réalisant le perçage des pièces en amont, directement lors de leur fabrication. Ce faisant, il devient nécessaire de surdimensionner les diamètres de perçage pour compenser les problèmes d'alignement des trous lors de l'assemblage des pièces et garantir l'insertion des fixations. Ce procédé d'assemblage engendre des combinaisons inédites, par rapport aux procédés d'assemblages usuels, de jeux importants et de désalignement des perçages, dont il est nécessaire d'étudier les effets sur le comportement et la tenue des jonctions.

Dans les assemblages classiques, des paramètres tels que le nombre de fixations, la géométrie et le jeu vont influencer les modes de transfert d'effort. Dans un assemblage à plusieurs fixations, une partie de l'effort transite entre les fixations sous forme d'effort passant. De plus, une partie de l'effort est également transmise au niveau de chaque fixation entre chaque plaque de l'assemblage et celle-ci, par matage. On observe donc une compétition entre la traction nette et le matage, dans laquelle on souhaite privilégier le second car il engendre une dégradation progressive du composite plutôt qu'une rupture brutale, et permet donc de continuer à transmettre les efforts après l'apparition de ruptures de fibres, d'endommagement matriciel ou de délaminages. Le matage a fait l'objet d'études numériques et expérimentales, par exemple dans le cas de plaques trouées composites [1], permettant d'observer et de modéliser le scénario d'endommagement et le pic de matage.

Les effets propres au procédé *hole-to-hole* ont été étudiés dans le cas des jonctions métalliques [2], [3], dans une configuration d'assemblage à deux boulons, avec une démarche à la fois expérimentale et numérique. Ces études se sont focalisées sur le « cas le pire » pour la tenue de l'assemblage métallique, en fonction d'autres paramètres tels que le diamètre des fixations ou l'épaisseur des plaques. À notre connaissance, aucune étude n'aborde spécifiquement le cas des assemblages composites *hole-to-hole*. En revanche, l'effet du jeu isolé [4] ou couplé à un pré-serrage [5] est abordé dans différentes études, relevant ses différents effets : perte de raideur de l'assemblage, développement précoce de l'endommagement et diminution de la tenue en matage.

Dans ce travail, on procède à la préparation numérique d'essais de caractérisation du comportement en matage de notre matériau. Pour ce faire, trois configurations sont étudiées et présentées dans la partie 2, ainsi que le modèle d'endommagement qui sera utilisé. Les configurations *quarter hole* (QH) et *half hole* (HH) seront étudiées expérimentalement. L'objectif de la partie 3 est de valider numériquement leur pertinence par rapport à une configuration de matage par un pion, dite de *full plate* (FP), représentative d'un assemblage simplifié. On analyse ainsi l'influence de la géométrie de ces configurations sur le transfert d'effort en matage au niveau du pion, ainsi que l'effet du jeu sur ce transfert, et la cohérence des scénarios d'endommagement.

## 2. Mise en place des modèles

### 2.1 Configurations étudiées

Les essais de caractérisation réalisés sont des essais de compression, permettant d'observer le comportement en matage du composite. Les simulations concernent trois configurations représentées en Fig. 1, choisies car elles permettent d'observer le scénario d'endommagement en matage. En effet, plus une configuration est représentative d'un assemblage boulonné réel, moins elle permet une observation directe de l'endommagement car la zone où se développe le matage est masquée par les fixations mécaniques. La configuration *quarter hole* permet l'observation optique directe du matage du composite sur la tranche de l'éprouvette. La configuration *half hole*, sur laquelle on observera l'endommagement à l'aide d'essais interrompus, est plus représentative d'un assemblage car sans effet de bord libre dans la zone de matage, mais elle ne représente qu'un demi-trou. Ces deux configurations permettent d'éviter les effets de la flexion du pion durant les tests, celui-ci étant appuyé sur un support rigide sur toute sa longueur. Enfin, la configuration *full plate* sert ici de référence, car elle est la plus proche des assemblages boulonnés, sans toutefois prendre en compte la technologie des fixations (tête de vis, écrou...) ou les effets de serrage. Le matériau est un composite à matrice therm durcissable renforcée de fibres de carbone IMA/M21e, et les pions métalliques sont en alliage Ta6V. L'empilement étudié est  $[45/0/-45/90]_{3S}$ , d'épaisseur théorique 4.42 mm. Les valeurs de jeu étudiées entre le pion et la plaque sont présentées en Tab. 1. Le sens fibre correspond à la direction Y dans le repère global.

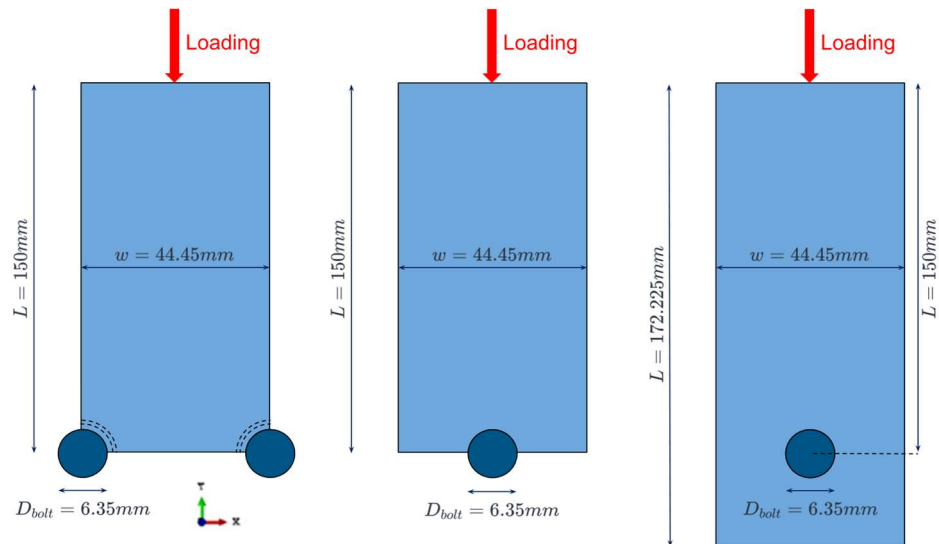


Fig. 1. Configurations de référence des essais de matage : quarter hole, half hole et full plate (de gauche à droite)

Sigle	Diamètre du pion (mm)	Jeu (mm)	Diamètre du trou (mm)
A0	6.35	0.00	6.35
A3	6.35	0.30	6.65
A5	6.35	0.50	6.85

Tab. 1. Tableau des jeux étudiés

## 2.2 Maillage et conditions aux limites

Les simulations sont réalisées à l’aide du logiciel éléments finis Abaqus. On modélise les pions et la plaque comme des solides 3D, la plaque étant construite pli à pli. Les éléments du maillage sont hexaédriques linéaires à intégration complète (C3D8). Le maillage de la plaque est progressivement déaffiné au loin des trous afin de réduire le temps de calcul. Le maillage est conforme entre les pions et la plaque dans la configuration ajustée A0, que ce soit sur le pourtour des trous ou dans le sens de l’épaisseur de la plaque, et comporte une couche d’éléments par pli (Fig. 2). Les pions sont encastés à leurs extrémités dans le modèle FP et sur le quart inférieur de leur surface dans les configurations QH et HH. Le contact est une interaction « node-to-surface » avec un coefficient de frottement de 0,2. Un déplacement est imposé sur l’extrémité supérieure de la plaque.

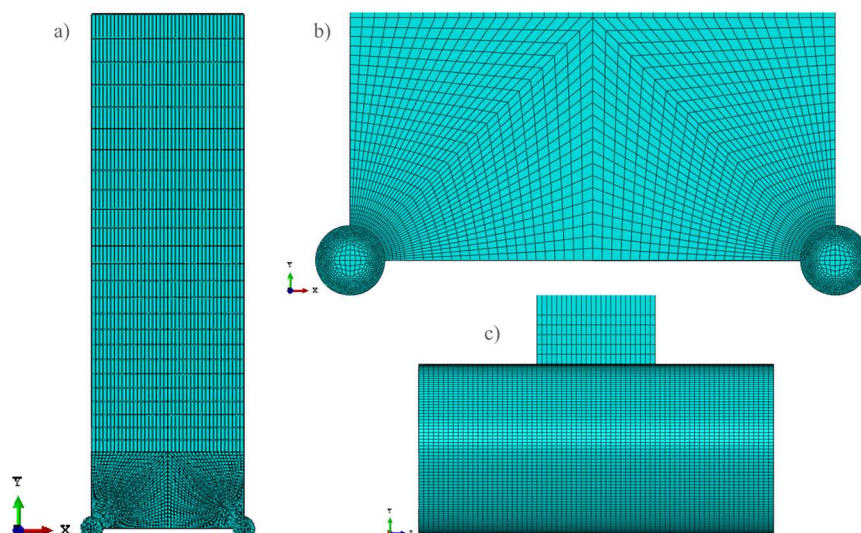


Fig. 2. Trois vues du modèle de la configuration quarter hole a) vue d’ensemble, b) zoom sur la zone d’intérêt à proximité des pions et c) vue de profil dans l’épaisseur de la plaque

### 2.3 Introduction du modèle d'endommagement OPFM

Pour la simulation de l'endommagement, nous utilisons le modèle d'endommagement progressif de l'ONERA (OPFM) [6]. Celui-ci permet de décrire la réduction des propriétés du pli unidirectionnel avec la progression de l'endommagement. Le calcul éléments finis permet ensuite de remonter au comportement global du stratifié en prenant en compte la séquence d'empilement. Les paramètres propres au modèle OPFM sont introduits dans les calculs via une subroutine UMAT.

Le modèle OPFM introduit le comportement non-linéaire élastique et viscoélastique du pli via des lois de comportement 3D. Il différencie également 6 types de ruptures : la rupture fibre, la rupture matricielle et la rupture inter-pli, avec pour chacun de ces trois modes une différenciation entre traction et compression. Le modèle nous donne donc accès à trois critères de rupture  $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_3$  correspondant aux trois modes de rupture (plus un indicateur binaire pour chacun, déterminant si le critère est activé en traction ou en compression), ainsi qu'aux variables d'endommagement normalisées correspondantes ( $0 < d_n^E < 1$ , avec  $n = 1, \dots, 3$ ). Les variables d'endommagement pilotent la dégradation des propriétés mécaniques du pli. Dans ces travaux, on active uniquement la variable  $d_2^E$ , les effets de la rupture fibre et du délaminage seront introduits ultérieurement.

## 3. Premiers résultats

### 3.1 Comparaison du champ de contraintes $\sigma_{11}$ et de la raideur globale entre les trois configurations

On compare la zone de contact avec le pion dans les trois configurations ajustée A0, à l'aide de vues en coupe pour les modèles HH et FP. (Fig. 3). De manière générale, on constate premièrement que les plis sont sollicités en traction lorsque les fibres sont tangentes au contact, et en compression lorsqu'elles lui sont normales. Dans le modèle QH, on constate un important effet de bord libre qui accentue la compression sens fibre dans les plis à  $0^\circ$ , à la verticale du contact. La présence de la partie inférieure de la plaque dans le modèle FP induit au droit du trou une contrainte en traction sens fibre très importante dans les plis à  $0^\circ$  et  $\pm 45^\circ$ , absente dans les configurations QH et HH. La traction dans les plis à  $90^\circ$  face au pion métallique, due à l'écrasement de la plaque sur le pion, est également plus importante dans cette configuration. Les raideurs globales des trois modèles sont proches, le modèle QH étant le plus raide et le modèle FP le plus souple. La différence est d'environ 11%, et peut s'expliquer par les variations géométriques et le nombre et la surface des contacts, notamment dans la géométrie de la configuration QH où les pions contiennent l'effet de Poisson, rendant l'ensemble plus rigide. La flexion du pion dans la configuration FP rend également plus souple le montage.

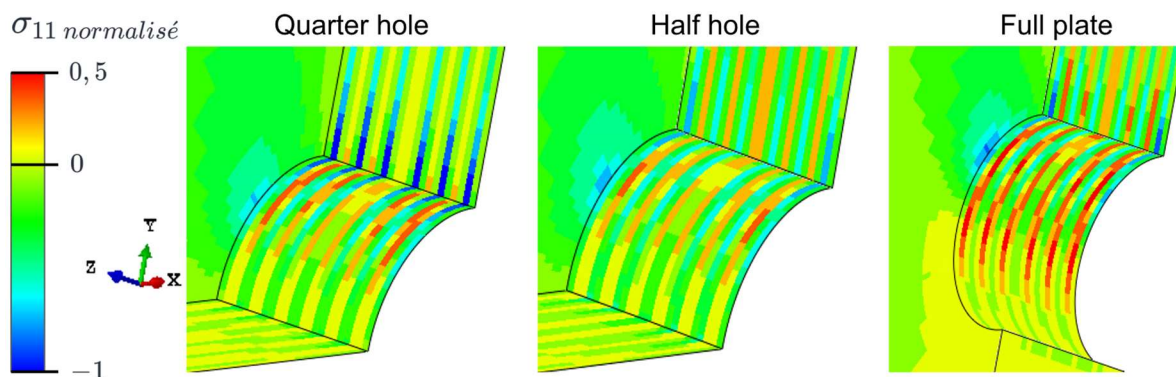


Fig. 3. Contrainte  $\sigma_{11}$  au contact dans les trois configurations ajustées A0 à iso-charge

### 3.2 Influence du jeu sur le comportement mécanique de la configuration *quarter hole*

Le jeu est étudié sur la configuration QH à l'aide de simulations élastiques linéaires. La présence de jeu amplifie les contraintes en sens fibre au niveau du contact (Fig. 4) : la traction dans les plis à  $\pm 45^\circ$  et la compression dans les plis à  $0^\circ$  sont doublées par la présence d'un jeu A5 par rapport à une configuration ajustée A0. Cette amplification des contraintes est notamment due à la réduction de la surface de contact entre la plaque et la fixation lorsqu'un jeu est introduit. La raideur des configurations avec jeu A3 et A5 n'est pas constante au cours du chargement. À mesure que la plaque s'écrase sur le pion, la surface de contact, initialement linéique, augmente. La raideur du modèle A3 est 22% plus faible que celle de A0 initialement, et 6% plus faible à la fin du chargement. Pour le modèle A5, la raideur est initialement 32% plus faible que le modèle A0, et augmente jusqu'à n'être que 9% plus faible en fin de calcul. La perte de raideur globale rejoint les observations d'autres études [4], [5] sur des matériaux composites différents.

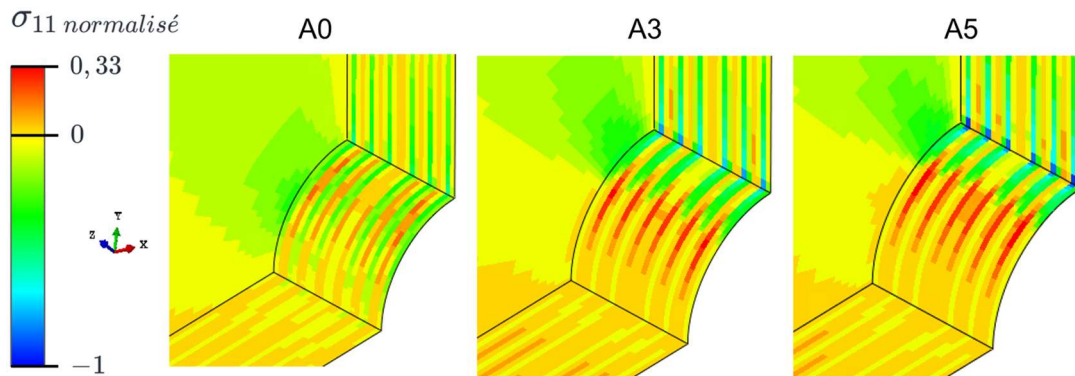


Fig. 4. Contrainte  $\sigma_{11}$  au contact droit du modèle *quarter hole* pour les 3 jeux étudiés, à iso-chargeant

### 3.3 Comparaison des scénarios d'endommagement dans les trois configurations ajustées

L'ajout du modèle OPFM introduit un comportement non-linéaire dû à l'élasticité non-linéaire, à la viscoélasticité et à l'endommagement matriciel et permet d'observer l'apparition des deux critères de rupture  $f_1$  et  $f_3$  et de l'endommagement  $d_2^E$  dans les trois configurations ajustées (Fig. 5). Comme observé sur la courbe de chargement, l'endommagement matriciel intervient sensiblement au même chargement dans les trois configurations. En revanche, les instants d'apparition de la rupture fibre et du délaminage dépendent grandement de la configuration.

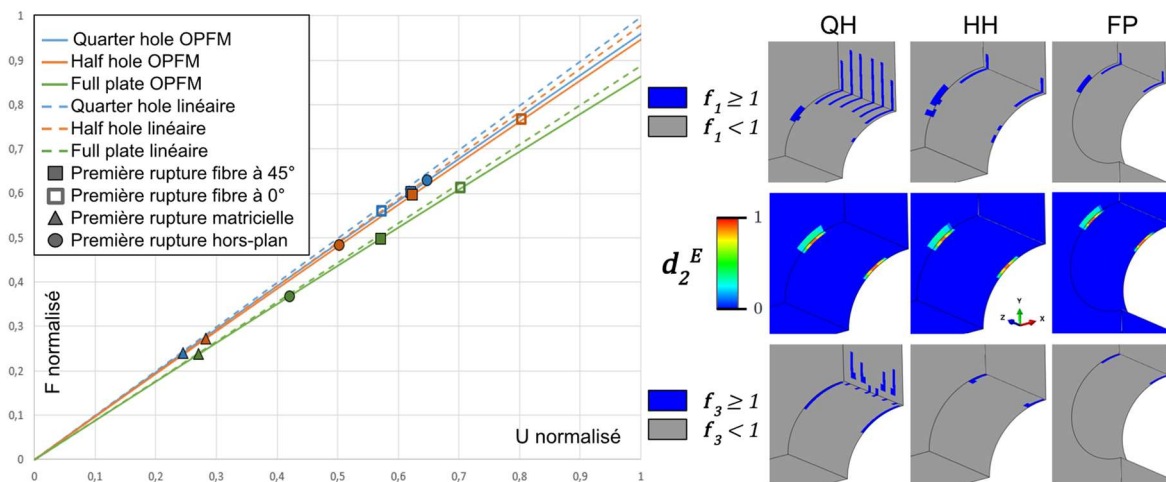


Fig. 5. Courbes force-déplacement (les traits en pointillés correspondent au calcul élastique linéaire et les traits pleins au calcul avec OPFM) et visualisation de  $f_1$ ,  $d_2^E$  et  $f_3$  à la force de première rupture augmentée de 50%, pour les trois configurations ajustées

L'endommagement matriciel caractérisé par  $d_2^E$  au cours du chargement apparaît dans les plis extérieurs. Les trois configurations s'endommagent visiblement de manière très similaire, ce qui explique leurs pertes de raideur très semblables. La rupture des fibres intervient dans les plis extérieurs à  $45^\circ$  et dans les plis à  $0^\circ$  face au pion, et est plus étendue et précoce dans la configuration QH de par les effets de bord libre. Ces observations correspondent au champ de contraintes observé précédemment (Fig. 3). Cependant, la concentration de contraintes dans les plis à  $45^\circ$  est, d'après nos observations, un effet du modèle, dont l'ajustement est parfait. Physiquement, on s'attend plutôt à observer la rupture dans les plis à  $0^\circ$ . Le critère  $f_3$  s'active dans les plis extérieurs face au pion, sur la zone de contact : c'est l'amorçage du délaminage, plus précoce dans la configuration FP où il est favorisé par la flexion du pion. Dans la configuration QH, l'effet de bord libre favorise le développement du délaminage dans l'épaisseur du composite.

#### 4. Conclusion

Les simulations effectuées nous ont permis de valider la bonne cohérence des trois configurations étudiées, et la pertinence d'utiliser expérimentalement les configurations QH et HH pour l'étude du scénario de matage. L'ordre d'apparition des différents types d'endommagement relevé dans les simulations est cohérent entre les trois configurations étudiées et la littérature. Les différences observées entre les configurations sont explicables par des effets géométriques et des effets de bord libre. On observe également que la présence de jeu diminue la raideur de l'assemblage et augmente les contraintes sur le bord chargé de la plaque, dans la zone de contact. L'étude du scénario d'endommagement sur des configurations parfaitement ajustées montre une zone critique du point de vue de la rupture des fibres tangentes au trou à  $45^\circ$  de la direction de l'effort, mais cette zone est soulagée en présence d'un jeu, même minimal, et ce sont alors les fibres à  $0^\circ$  alignées avec la direction de l'effort qui reprennent la majeure partie de la charge de matage et rompent en premier face au pion.

Afin de pousser plus loin notre étude du matage, et, au-delà, des assemblages *hole-to-hole*, une campagne expérimentale est prévue. La comparaison essais/calculs permettra d'enrichir le modèle OPFM avec la dégradation des propriétés due à la rupture progressive des fibres, ainsi qu'une modélisation du plateau de matage. On étudiera aussi l'apport d'éléments de zone cohésive pour capturer les effets du délaminage sur la rupture des assemblages *hole-to-hole*.

#### Références

- [1] M. Broutelle, F. Lachaud, C. Duplex-Couderc, et A. Daidié, « Comportement en matage de composites à matrice céramique oxyde/oxyde », présenté à *Journées Nationales sur les Composites*, Champs-sur-Marne, France, 2017.
- [2] G. Pichon, L. Meouchy, A. Daidié, E. Paroissien, et A. Benaben, « Etude numérique du comportement mécanique d'assemblage hole-to-hole sous sollicitation quasi statique », in *25ème Congrès Français de Mécanique*, Nantes, France, 2022.
- [3] G. Pichon, A. Daidié, E. Paroissien, et A. Benaben, « Quasi-static strength and fatigue life of aerospace hole-to-hole bolted joints », *Engineering Failure Analysis*, vol. 143, p. 106860, 2023.
- [4] C. T. McCarthy, M. A. McCarthy, et V. P. Lawlor, « Progressive damage analysis of multi-bolt composite joints with variable bolt-hole clearances », *Composites Part B: Engineering*, vol. 36, n° 4, p. 290-305, 2005.
- [5] Y. Zhai, D. Li, X. Li, L. Wang, et Y. Yin, « An experimental study on the effect of bolt-hole clearance and bolt torque on single-lap, countersunk composite joints », *Composite Structures*, vol. 127, p. 411-419, 2015.
- [6] F. Laurin, N. Carrère, et J.-F. Maire, « A multiscale progressive failure approach for composite laminates based on thermodynamical viscoelastic and damage models », *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, n° 1, p. 198-209, 2007.