



**HAL**  
open science

## Etude du transfert de charge dans les assemblages composites hybrides boulonnés et collés

Christophe Bois, Marilena Colt, Hervé Wagnier, Jean-Christophe Wahl

► **To cite this version:**

Christophe Bois, Marilena Colt, Hervé Wagnier, Jean-Christophe Wahl. Etude du transfert de charge dans les assemblages composites hybrides boulonnés et collés. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.173. hal-00597750

**HAL Id: hal-00597750**

**<https://hal.science/hal-00597750>**

Submitted on 1 Jun 2011

**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.

# Etude du transfert de charge dans les assemblages composites hybrides boulonnés et collés

## *Study of load transfer in hybrid bolted/bonded composite joints*

Christophe Bois<sup>1</sup>, Marilena Colt<sup>1,2</sup>, Hervé Wargnier<sup>1</sup>, Jean-Christophe Wahl<sup>1</sup>

1 : Université de Bordeaux, Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux  
15 rue Naudet CS 10207, 33175 Gradignan Cedex

2 : Politehnica University of Bucharest  
e-mail : christophe.bois@u-bordeaux1.fr, marilenuzta\_z@yahoo.com,  
herve.wargnier@u-bordeaux1.fr, jean-christophe.wahl@u-bordeaux1.fr

### Résumé

Aujourd'hui la plupart des assemblages mécaniques aéronautiques constitués de boulons ou de rivets comporte un mastic d'interface pour assurer l'étanchéité et éviter les problèmes de fretting corrosion en fatigue. Les avionneurs cherchent à donner au mastic une fonctionnalité structurale et ainsi réduire le nombre de fixations. Le dimensionnement de ces assemblages hybrides doit s'appuyer sur des modèles de comportement qui permettent de déterminer les taux de transfert de charge entre le boulon ou le rivet et le joint de colle. Dans cet article nous proposons une démarche basée sur un modèle analytique et une approche multicritères qui intègre les modes de rupture du composite et de l'adhésif. Les critères de rupture du composite sont basés sur les travaux de Hart-Smith développés pour les assemblages boulonnés tandis que le critère de rupture de l'adhésif est basé sur la déformation de cisaillement maximale. La validité de ce modèle est discutée à partir des résultats d'un modèle numérique et des résultats expérimentaux obtenus sur des assemblages collés, boulonnés et hybrides.

### Abstract

Most of aeronautic mechanical joints made of bolts or rivets include interface mastic in order to ensure sealing and avoid fretting corrosion phenomena. Aircraft manufacturers wish use the interface mastic as a structural part in the way to reduce the number of fasteners. The dimensioning of hybrid joints needs modelling to evaluate the loading transfer rate between the bolt or the rivet and the adhesive. In this paper we propose a strategy based on an analytic model and a multi-criteria approach which includes both composite and adhesive failures. Composite failure criteria are based on Hart-Smith works while adhesive criterion is based on maximal shear strain. The validity of the model is discussed using FEM simulations and tests performed on bonded, bolted and hybrid joints.

**Mots Clés :** assemblages boulonnés, assemblages collés, critère de résistance, transfert de charge

**Keywords :** bolted joints, bonded joints, composite strength, load transfer

## 1. Introduction

Un avion civil comporte plus d'un million de fixations et l'assemblage des pièces représente environ 50 % de son coût de fabrication. Par ailleurs, la réalisation de liaison ou d'assemblage de pièces composites demeure un problème technologique tant du point de vue de la mise en œuvre que de la tenue mécanique en service.

Différentes technologies d'assemblage peuvent être utilisées : boulonnage, rivetage, collage, insert métallique taraudé, ou combinaison de ces technologies. Ces différentes technologies engendrent des sollicitations spécifiques dans le matériau composite : compression dans le plan de la stratification (matage pour un boulonnage ou un rivetage), compression hors plan (précharge d'un boulon), cisaillement hors plan (collage). Le comportement des matériaux composite pour ce type de sollicitation est fortement non linéaire en raison de la présence de différents types d'endommagement (micro-flambage des fibres, fissuration de la matrice, délaminage). De plus, la présence d'interfaces entre matériaux différents engendre des mécanismes de transferts de charge complexes : contact frottant avec jeu ou précharge qui peuvent évoluer en raison de la déformation des pièces, des dilatations différentielles et du fluage des matériaux notamment celui du polymère de la matrice du composite.

Aujourd'hui la plupart des assemblages mécaniques aéronautiques constitués de boulons ou de rivet comporte un mastic d'interface pour assurer l'étanchéité et éviter les problèmes de fretting corrosion [1]. Les avionneurs cherchent à donner au mastic une fonctionnalité structurale et ainsi réduire le nombre de fixations.

Le dimensionnement de ce type d'assemblage doit s'appuyer sur des modèles de comportement qui permettent d'optimiser les paramètres de conception (dimensions, propriétés de l'adhésif, couple de serrage, ...) optimaux en termes de résistance ou de raideur. La difficulté réside alors dans la détermination du taux de transfert de charge entre le boulon ou le rivet et le joint de colle. Si on utilise un joint de colle structural classique (adhésif de rigidité proche de 1 GPa et épaisseur inférieure à 0.25 mm), la charge est transmise quasiment exclusivement par l'adhésif même si celui-ci à la capacité de plastifier. Ainsi la conception d'un assemblage hybride boulonné collé nécessite un modèle de comportement de l'assemblage complet afin de déterminer les paramètres optimaux du joint de colle. Paroissien et al. ont proposé une démarche pour modéliser le comportement d'assemblages hybrides de pièces métalliques basé sur des modèles analytiques et numériques ainsi qu'une identification expérimentale [1,2]. Les modèles proposés intègrent le comportement élastoplastique de l'adhésif et un modèle de raideur du boulon. Mais les auteurs ne traitent pas de l'optimisation de l'assemblage et en particulier du choix crucial du rapport entre le diamètre et l'espacement entre boulons.

Dans cet article nous proposons une démarche basée sur une approche multicritères qui intègre les modes de rupture du composite (matage et rupture dans la section du boulon) comme illustré sur la Figure 1, et la rupture de l'adhésif. Un modèle analytique est proposé et validé par un modèle numérique prenant en compte le comportement élastoplastique de l'adhésif ainsi que les conditions de contact entre le boulon et les pièces. Les critères de rupture du composite sont basés sur les travaux de Hart-Smith développés pour les assemblages boulonnés [3] tandis que le critère de rupture de l'adhésif est basé sur la déformation de cisaillement maximale [4]. La validité de ces critères est discutée à partir des résultats du modèle numérique et des résultats expérimentaux obtenus sur des assemblages collés, boulonnés et hybrides.

## 2. Description et validation du modèle analytique

Le modèle analytique a pour objectif de déterminer les charges transmises dans les zones de rupture du composite et les déformations dans l'adhésif afin d'appliquer les critères de ruptures. Le transfert de charge dans un assemblage hybride est décrit sur la Figure 2. La charge transmise par cisaillement dans le joint de colle peut être considérée comme parallèle à celle transférée par contact entre le boulon et le trou. Cependant le chargement transféré par cisaillement en amont du boulon génère un chargement axial dans la section du boulon qui se cumule à celui transféré par le boulon.

Le modèle analytique uni-axial utilisé est basé sur celui proposé par Paroissien et al.. Les pièces assemblées sont supposées soumises à un effort de traction pure tandis que le joint de colle est supposé en cisaillement pur [5]. Les boulons sont modélisés par des ressorts linéaires de raideur  $k_i$  exerçant une force  $F_i$  sur la section d'abscisse  $x_i$  de chacune des pièces comme représenté sur la Figure 3. On note  $\tau_i$  le taux de transfert de charge du boulon  $i$  défini part :

$$F_i = \tau_i F = k_i (u_i^1(d_i) - u_i^2(d_i)) \quad (\text{Eq. 1})$$

L'hypothèse de comportement linéaire des boulons implique un ajustement sans jeu entre le fut du boulon et l'alésage composite.

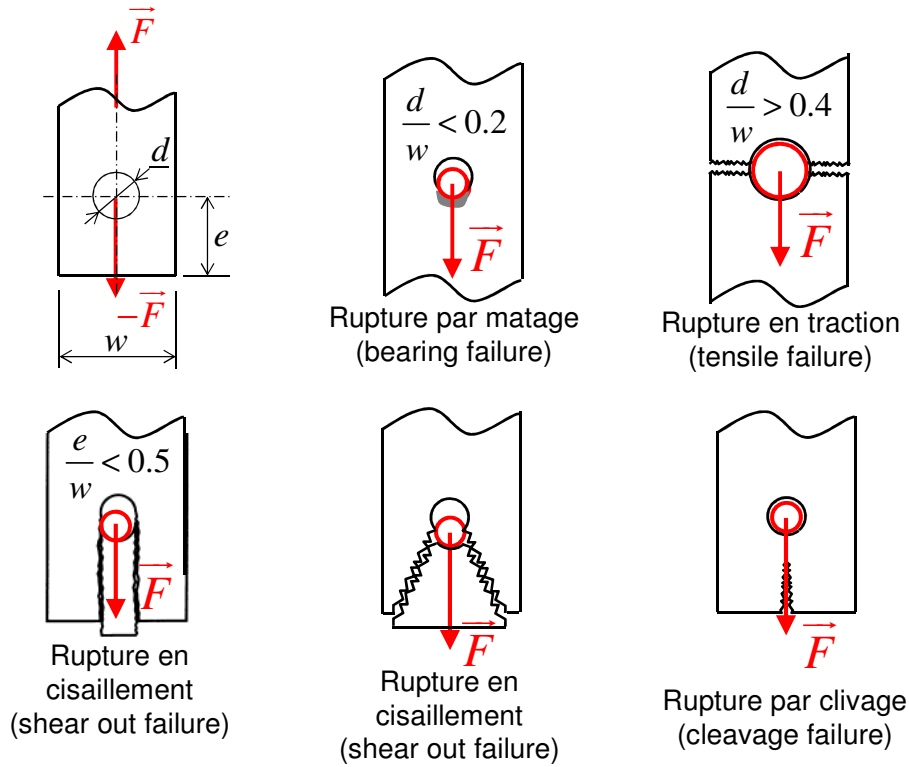


Fig. 1. Modes de rupture dans un assemblage hybride boulonné collé.

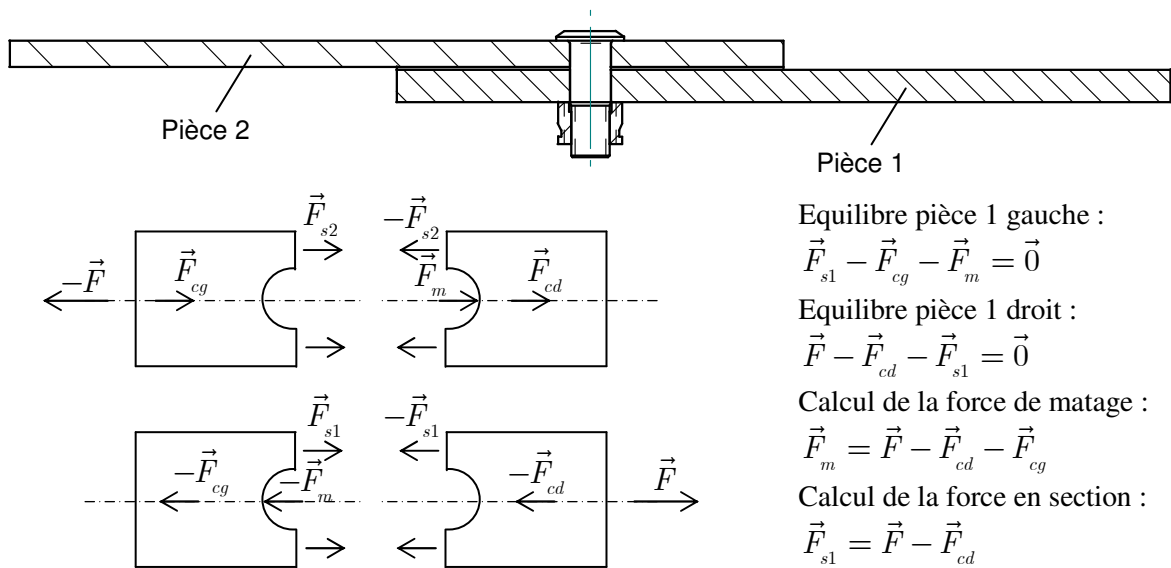


Fig. 2. Description du transfert de charge dans un assemblage hybride boulonné collé simple recouvrement.

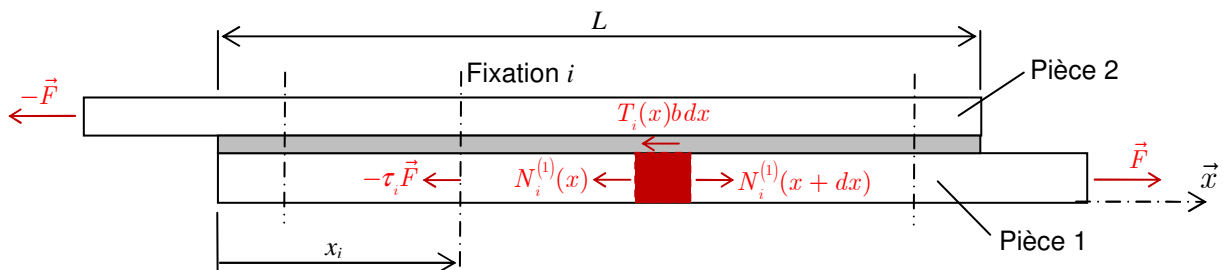
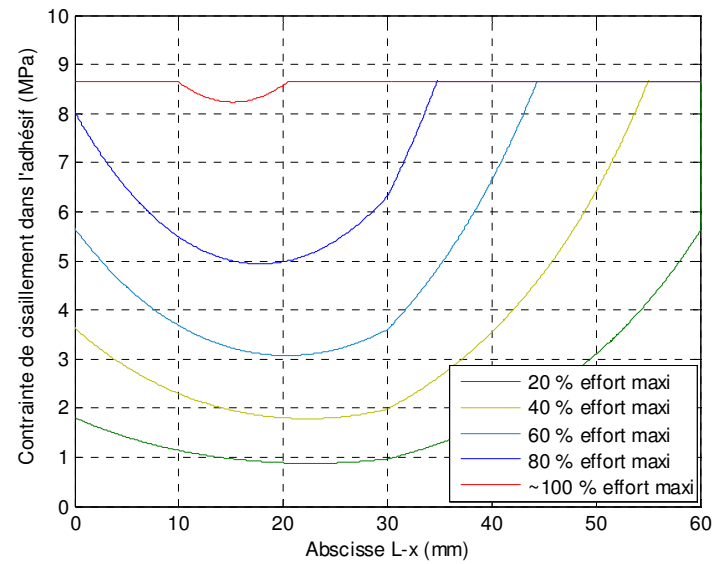
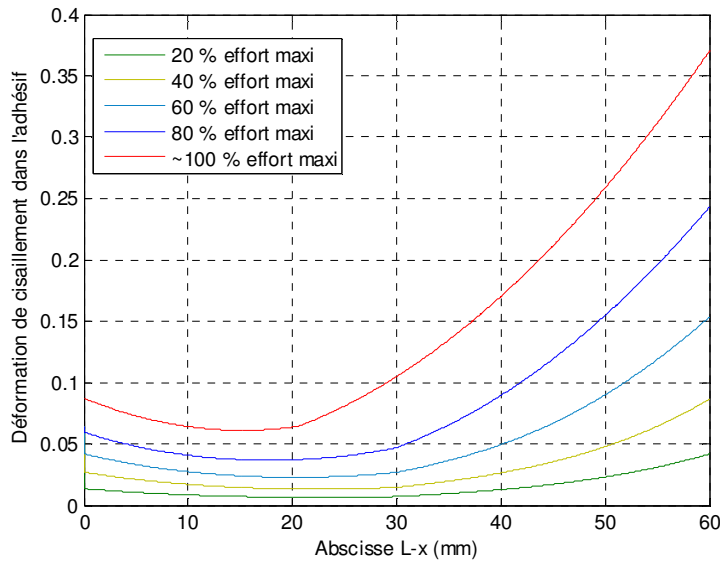


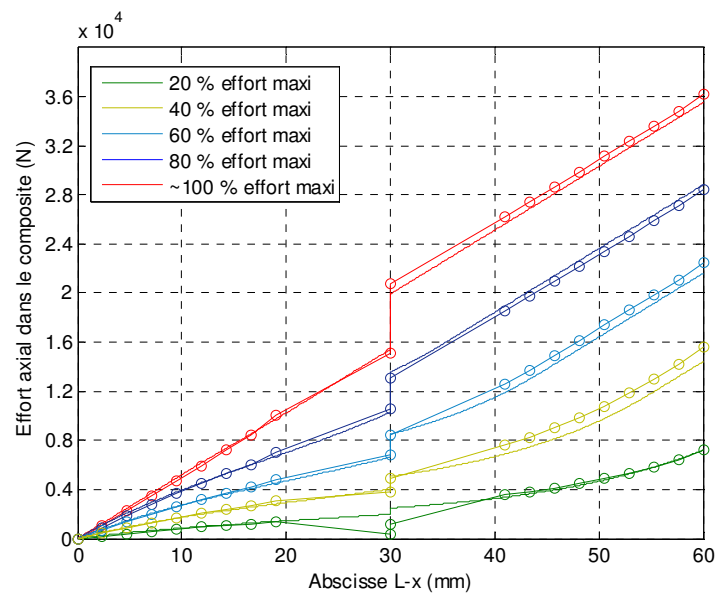
Fig. 3. Modélisation uni-axial d'un assemblage hybride boulonné collé.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Distribution de la contrainte (a) et de la déformation (b) de cisaillement dans l'adhésif ainsi que l'effort axial dans la pièce composite (c) (- analytique, -o- éléments finis) dans un assemblage hybride boulonné collé.

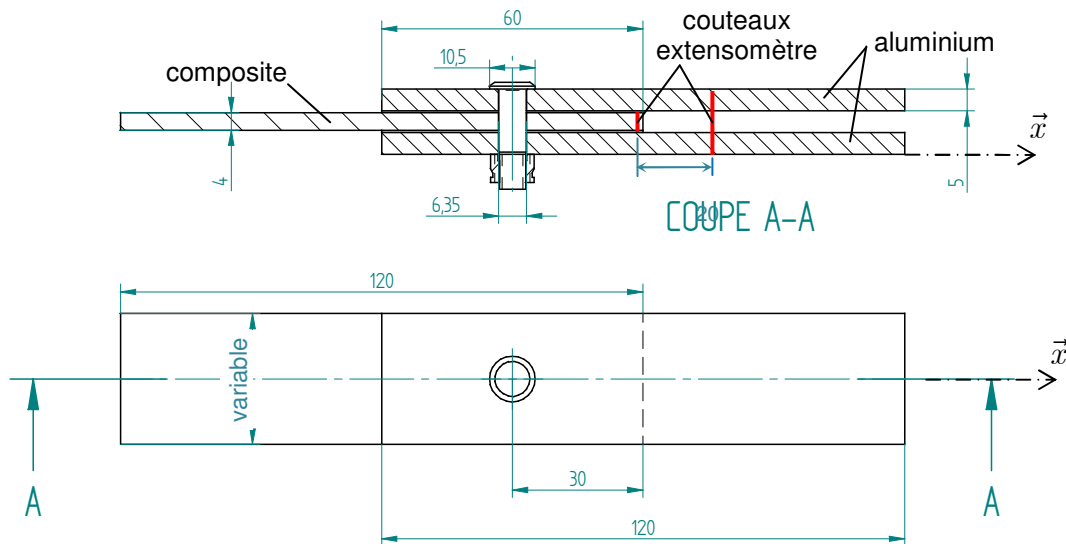


Fig. 5. Géométrie et instrumentation de l'assemblage hybride boulonné collé.

La résolution s'effectue en intégrant par morceaux les équations d'équilibres dans lesquelles les relations de comportement ont été introduites. La description complète et la résolution du modèle peut être trouvée dans [1].

Ce modèle permet d'introduire aisément un comportement élastoplastique parfait de l'adhésif ce qui est incontournable pour l'étude des assemblages hybrides. La Figure 4 montre la distribution de l'effort axial dans la pièce composite, ainsi que la contrainte et de la déformation de cisaillement dans l'adhésif pour un assemblage hybride en configuration double recouvrement (Figure 5). Les caractéristiques utilisées pour ces modèles sont rassemblées dans le Tableau 1. Dans ce modèle le paramètre le plus difficile à déterminer est la raideur du boulon. Cette raideur intègre le comportement du contact vis alésages (avec ou sans jeu) ainsi que la déformation globale du boulon en flexion et en cisaillement. Même si certains auteurs proposent des formulations plus ou moins généralisables permettant de quantifier cette raideur [1,6], nous avons préféré identifier celle-ci à partir d'essai de type « matage pur » [7]. Cette raideur peut être considérée comme proportionnelle au diamètre du boulon et à l'épaisseur du stratifié. Pour les chargements importants, la plasticité de l'adhésif permet d'augmenter significativement le taux de transfert de charge du boulon.

<b>Pièce composite T700/M21 quasi-isotrope [7]</b>		<b>Pièce aluminium 2024</b>	
Module homogénéisé $E_2$	48 GPa	Module $E_1$	68 GPa
Résistance homogénéisé $\sigma_r$	600 MPa	Résistance élastique $R_{p0.2}$	290 MPa
Résistance au matage $p_m$	475 MPa	Coefficient de Poisson	0.3
Epaisseur $e_2$	4 mm	Epaisseur $e_1$	5 mm
<b>Joint de colle 3M 2216</b>		<b>Boulon Hi-Lok Titane</b>	
Module $E$	350 MPa	Module $E_3$	106 GPa
Coefficient de Poisson	0.3	Coefficient de Poisson	0.33
Résistance élastique $R_e$	15 MPa	Résistance élastique $R_e$	830 MPa
Déformation maximale $\varepsilon_r$	0.45	Diamètre $d$	6.35 mm
Epaisseur $e$	0.5 mm	Raideur $k$	70 kN/mm
Longueur $L$	60 mm		
Largeur $w$	30 mm		

Tab. 1. Caractéristiques de l'assemblage utilisées pour les modèles analytique et numérique.

Pour valider le modèle analytique nous avons utilisé un modèle éléments finis intégrant le contact boulon pièces au niveau du perçage et de la tête de la vis. Le composite est modélisé par un empilement de plis isotropes transverses au comportement élastique linéaire. L'adhésif est modélisé par un matériau élastoplastique parfait identique au modèle analytique. La Figure 4(c) permet de comparer le flux d'effort dans la pièce composite obtenus avec le modèle analytique et le modèle éléments finis. Les deux modèles donnent des résultats similaires ce qui permet de conclure que le modèle analytique peut être utilisé à la place d'un modèle éléments finis lourd pour déterminer les charges globales transmises par la pièce composite dans les 2 zones critiques à savoir  $F_s$  et  $F_m$  ainsi que la déformation maximale de cisaillement dans l'adhésif  $\varepsilon_a$ .

### 3. Définition des critères de rupture

#### 1.1 Rupture de l'adhésif

De très nombreuses études portent sur la tenue des joints de colle. Certains auteurs se concentrent sur l'adhésion en étudiant l'influence de la préparation de surface et/ou du vieillissement en environnement sévère sur la tenue mécanique. D'autres étudient l'état de contrainte dans le joint et proposent des modèles élastoplastiques avec des critères seuil du type Drucker-Prager associés à un critère de rupture en déformation [4,8,9]. Le modèle analytique utilisé donne accès uniquement à la contrainte de cisaillement et néglige donc de fait les contraintes de pelage qui dans certains cas pilote fortement la rupture. La configuration double recouvrement et l'utilisation d'une colle souple et ductile limitent fortement les contraintes de pelage. Nous avons donc choisi un critère de rupture en déformation de cisaillement maximale.

Le critère de résistance de l'adhésif s'exprime alors par :

$$c_{ra} = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_r} \quad (\text{Eq. 2})$$

Les propriétés de l'adhésif 3M 2216 ont été identifiées à partir d'essais sur assemblages collés en configuration double recouvrement (Tableau 1).

#### 1.2 Rupture du composite dans la section du boulon

L'utilisation du modèle analytique présenté précédemment pour le pré-dimensionnement exclu l'introduction de loi de comportement non-linéaire de type endommageable [10].

Sur la base des travaux de Hart-Smith [3], nous avons choisi un critère de rupture du composite basé sur un calcul élastique de plaque homogénéisée trouée et chargée par un axe rigide. Ce modèle conduit à un coefficient de concentration de contrainte  $K_{te}$  dans la section du trou qui peut s'exprimer par :

$$K_{te} = \frac{d}{w} + \frac{w}{d} + 0.5 \left( 1 - \frac{d}{w} \right) \theta \quad (\text{Eq. 3})$$

Où  $\theta$  traduit l'influence de la distance du trou au bord libre  $e$  :

$$\theta = \frac{w}{e} - 1 \text{ si } e < w \text{ et } \theta = 1 \text{ si } e \geq w \quad (\text{Eq. 4})$$

Toute fois une approche linéaire avec un critère de rupture « élastique » conduit à des résistances très conservatives (-50%). Hart-Smith, sur la base de nombreux essais, propose de corriger le coefficient de concentration de contrainte  $K_{te}$  en définissant un coefficient « adouci »  $K_{te}$  tel que :

$$1 - K_{tc} = C(1 - K_{te}) \quad (\text{Eq. 5})$$

$C$  traduit la redistribution des contraintes due aux phénomènes non linéaires comme l'endommagement.  $C$  dépend fortement de la stratification, mais étant donné que dans les zones d'assemblages une proportion minimale de fibre à  $90^\circ$  et  $\pm 45^\circ$  est nécessaire pour éviter les modes de rupture en cisaillement et en clivage (Figure 1), la stratification est souvent proche d'un quasi-isotrope et  $C$  est alors proche de 0.25 d'après les travaux de Hart-Smith [3].

La contrainte maximale peut alors s'exprimer en fonction de l'effort  $F_s$  :

$$\sigma_{\max} = \frac{K_{tc} F_s}{e_2 (w - d)} \quad (\text{Eq. 6})$$

Le critère de résistance dans la section du boulon s'exprime alors par :

$$c_{rs} = \frac{K_{tc} F_s}{\sigma_r e_2 (w - d)} \quad (\text{Eq. 7})$$

Où  $\sigma_r$  est la contrainte homogénéisée à rupture du stratifié.

Ce critère est validé à partir d'essais sur assemblages boulonnés double recouvrement avec un rapport  $d/w$  de 0.42 pour s'assurer d'obtenir une rupture dans la section du boulon. La géométrie et l'instrumentation des assemblages sont décrites sur la Figure 5. 3 couples de serrage différents et 2 valeurs différentes de jeu ont été testés afin de quantifier l'influence de ces deux paramètres sur la résistance. La Figure 6 donne les courbes effort extensomètre pour les différentes configurations. Notons qu'un serrage nul correspond au montage d'un boulon où les faces d'appui de la tête et de l'écrou sont en contact avec les pièces assemblées ; si bien qu'un confinement est réalisé mais sans précharge.

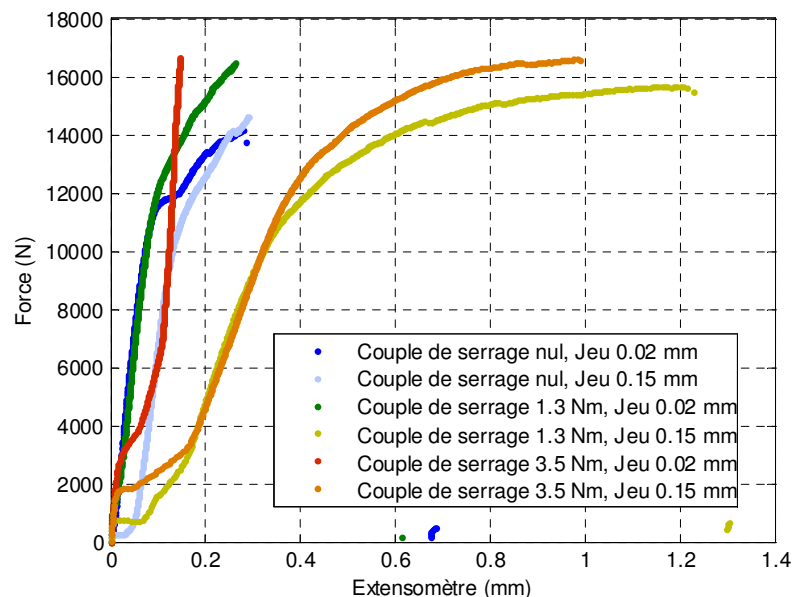


Fig. 6. Courbes force extensomètre pour un assemblage boulonné avec un rapport  $d/w = 0.42$ .



La rupture est quasiment toujours précédée d'une phase de dégradation par matage qui est toutefois nettement plus marquée en présence de jeu. La résistance est légèrement plus importante en présence de précharge, mais cette augmentation semble correspondre à la force transmise par adhérence entre les pièces. Cette force est facilement identifiable sur les assemblages avec jeu car les courbes présentent un plateau en début de chargement avant que le contact boulon composite ne soit effectif. En appliquant le critère de rupture proposé ci-dessus on obtient un effort de 14350 N pour une résistance  $\sigma_r = 600$  MPa obtenue à partir d'un essai de traction sur le même stratifié. Cette valeur concorde bien avec les résultats présentés sur la Figure 6 si l'on retranche la force transmise par adhérence entre les pièces. Le choix du critère est donc validé.

### 1.3 Dégradation du composite par matage

La pression de contact appliquée par l'axe du boulon engendre une dégradation du composite autour du trou communément appelé matage. Ce phénomène est lié à différents mécanismes d'endommagement comme la rupture en compression sens fibre par micro-flambage, la fissuration ou microfissuration matricielle et le délaminage. Comme pour les autres modes de rupture, certains auteurs proposent des modèles non linéaires. Il s'avère qu'un des éléments primordial pour la modélisation du comportement au matage est la non linéarité du comportement élastique en compression sens fibre car cette non linéarité permet de redistribuer les contraintes en bord de trou [6,11]. Cependant les résultats expérimentaux que nous avons obtenus ainsi que ceux trouvés dans la bibliographie montrent que pour un matériau et une stratification hors plan donné la force d'initiation du matage peut être considérée proportionnelle au diamètre du trou et à l'épaisseur du composite [6,12] :

$$F_m^{\max} = p_m b d \quad (\text{Eq. 8})$$

Le critère de résistance en matage s'exprime alors par :

$$c_{rm} = \frac{F_m}{p_m b d} \quad (\text{Eq. 9})$$

Ce critère est validé de la même manière que pour la rupture dans la section du boulon, mais avec un rapport  $d/w$  de 0.21 pour s'assurer d'obtenir une dégradation par matage. La Figure 7 donne les courbes effort extensomètre pour les différentes configurations. On peut distinguer 4 phases : (1) avant glissement, (2) glissement et établissement du contact, (3) chargement quasi linéaire, (4) matage avec augmentation ou non de la charge. En l'absence de confinement ou de couple de serrage le passage de la phase (3) à (4) est plus marqué, tandis que plus le couple de serrage est important, plus la transition est progressive. La Figure 8 présente l'effort correspondant à l'initiation du matage (fin de la phase 3) et l'effort maximal en fonction du couple de serrage. A titre indicatif les valeurs obtenues pour un assemblage sans confinement (pas de contact entre les pièces assemblées) ont été ajoutées (arbitrairement abscisse = -1). La force d'initiation du matage dépend assez peu du confinement alors que l'effort maximal double en présence de confinement quel que soit la précharge appliquée. Le critère doit permettre de prédire l'initiation du matage et non la force maximale car au-delà de l'initiation la raideur de l'assemblage change ce qui est contradictoire avec l'hypothèse formulée pour le modèle analytique.

D'après la Figure 8, l'effort d'initiation du matage est d'environ 12000 N, ce qui correspond à une pression  $p_m = 475$  MPa. Cette valeur est en accord avec les valeurs trouvées dans la bibliographie pour ce matériau [6, 12].

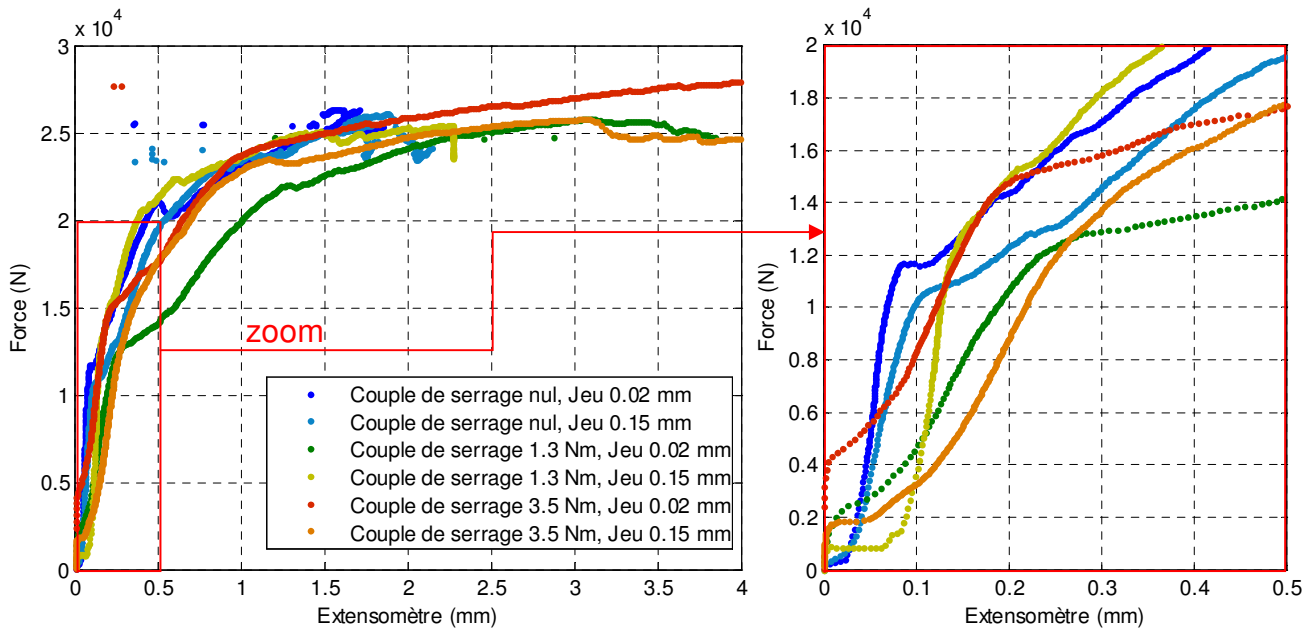


Fig. 7. Courbes force extensomètre pour un assemblage boulonné avec un rapport  $d/w = 0.21$ .

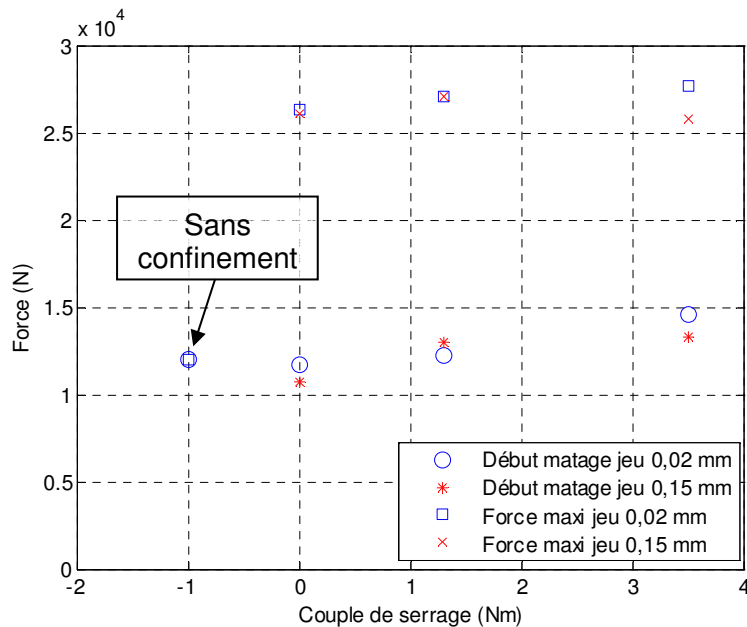


Fig. 8. Résistance en fonction du couple de serrage pour un assemblage boulonné avec un rapport  $d/w = 0.21$ .

#### 4. Etude des assemblages hybrides

Le modèle analytique associé au critère de rupture permet de déterminer l'efficacité d'un assemblage hybride. L'efficacité peut être défini par :

$$eff_i = \frac{F_{\text{assemb}}}{F_{\text{pièce } i}} \quad (\text{Eq. 10})$$

où  $F_{\text{assemb}}$  est la résistance de l'assemblage et  $F_{\text{pièce } i}$  est la résistance de la pièce en amont de l'assemblage (même épaisseur que dans la zone de l'assemblage). L'efficacité traduit l'aptitude d'un assemblage à transmettre les efforts que peut supporter la pièce assemblée. Une bonne conception se traduit par une efficacité égale à 1 : l'assemblage n'est alors pas le point faible de la structure. Dans la suite on s'intéresse à l'efficacité relative à la pièce composite.

Par définition, la résistance de la pièce composite est définie par :

$$F_{\text{pièce } i} = \sigma_r w e_2 \quad (\text{Eq. 11})$$

La Figure 9 montre l'évolution de l'efficacité de différents types d'assemblage en fonction du rapport  $d/w$ . Notons que l'efficacité d'un assemblage collé ne dépend évidemment pas du rapport  $d/w$ , mais il dépend de l'épaisseur de la pièce assemblée. A l'inverse, l'efficacité d'un assemblage boulonné ne dépend pas de l'épaisseur de la pièce. L'assemblage hybride permet d'augmenter significativement la performance maximale de l'assemblage mais surtout d'élargir le domaine de fonctionnement et ainsi d'augmenter les marges de dimensionnement.

Des essais sur assemblages hybrides en configuration double recouvrement ont été réalisés pour deux rapports  $d/w$  différents : 0.21 et 0.42 en conservant un diamètre de boulon de 6.35 mm. Les autres caractéristiques de l'assemblage sont données dans le Tableau 1. La Figure 10 montre les courbes force en fonction du déplacement de la traverse obtenues lors de ces essais. Pour le rapport  $d/w = 0.21$ , comme prédit par le modèle, la rupture s'initie dans le joint de colle où la déformation dans l'adhésif est maximale, c'est à dire près du bord libre de la pièce aluminium ( $x = 0$  sur les Figures 3 et 5). Le joint se fissure brutalement sur 2/3 de sa longueur, dès lors le boulon reprend la quasi-totalité de la charge et le processus de matage débute. Pour le rapport  $d/w = 0.42$ , le modèle prévoit que le critère de rupture dans l'adhésif et le critère de rupture dans la section du boulon atteigne 1 quasi simultanément. Lors des essais, après une première initiation de fissure dans l'adhésif entre 80 et 90% de la charge maximale, les ruptures complètes du joint de colle et du composite se produisent simultanément.

L'effort maximal permet de calculer l'efficacité et ainsi de placer les points expérimentaux sur la Figure 9. Les efficacités expérimentales des assemblages hybrides s'avèrent supérieures à celles prédites par le modèle. Rappelons que tous les paramètres du modèle analytique ont été identifiés à partir d'assemblages boulonnés ou collés et que les efficacités sont extrêmement sensibles à certains paramètres comme la rigidité de l'adhésif, l'épaisseur du joint et la raideur du boulon.

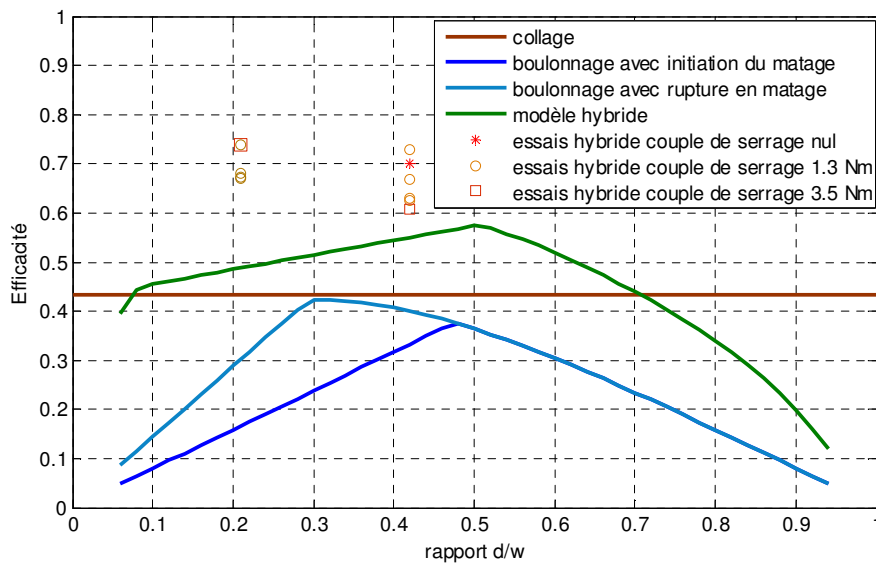


Fig. 9. Efficacité de différents types d'assemblage pour une épaisseur du composite de 4 mm.

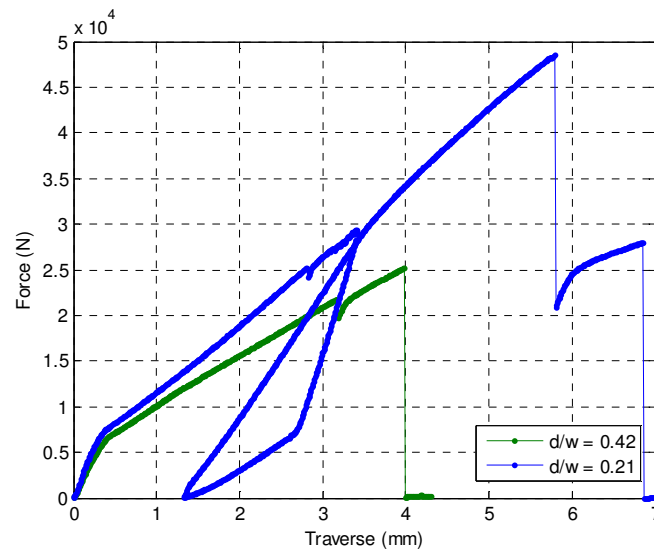


Fig. 10. Courbes force déplacement de la traverse pour les assemblages hybrides (couple de serrage 1.3 Nm).

## 5. Conclusion et perspectives

L'étude présentée dans cet article vise à proposer un modèle semi-analytique permettant de quantifier les transferts de charge dans un assemblage hybride boulonné et collé et de déterminer les niveaux de rupture dans l'adhésif d'une part et dans le composite d'autre part. Un certain nombre de paramètres difficile à identifier comme la rigidité de l'adhésif et la raideur du boulon ont une grande influence sur la répartition des charges entre l'adhésif et le composite ce qui rend délicate la validation expérimentale du modèle. La mesure expérimentale des transferts de charge en instrumentant le boulon ou en mesurant le champ de déformation dans l'adhésif et dans l'une des pièces permettrait de valider le modèle et d'identifier plus précisément la raideur du boulon. D'autre part le rôle de la précharge du boulon sur le comportement de l'adhésif n'est pas encore précisément identifié. Les simulations éléments finis montrent que le serrage génère un champ de contraintes hors plan de compression près de la zone de serrage et de traction aux extrémités du joint de colle ce qui peut modifier le comportement à rupture de l'adhésif.

Toute fois le modèle permet d'ores et déjà de mettre en évidence l'influence des paramètres de conception et ainsi d'optimiser un assemblage hybride avec un minimum d'essais mécaniques.

## Références

- [1] E. Paroissien, « Contribution aux assemblages hybrides (boulonnés/collés) - Application aux jonctions aéronautiques ». *Thèse de doctorat, Université Toulouse III*, 2006.
- [2] C.-T. Hoang-Ngoc, E. Paroissien, « Simulation of single-lap bonded and hybrid (bolted/bonded) joints with flexible adhesive ». *Int. J. of Adhesion and Adhesives*, Vol. 30, pp. 117-129, 2010.
- [3] L. J. Hart-Smith, « Bolted Joint Analysis for Composite Structures ». *Section 3 of Joining and Repair of Composite Structures*, Ed. Keith T. and Hyonny K., *ASTM International*, 2004.
- [4] I. Pires, L. Quintino, R.M. Miranda, « Numerical simulation of mono- and bi-adhesive aluminium lap joints ». *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2006.
- [5] O. Volkersen, « Die Nietkraftverteilung in Zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten ». *Luftfahrtforschung*, Vol. 15, pp. 41-47, 1938.
- [6] H. Huth, « Influence of fastener flexibility on the prediction of load transfer and fatigue life for multiplierow joints, Fatigue in mechanically fastened composite and metallic joints ». *ASTM STP 927*, John M. Potter, Ed., Philadelphia, PA, pp. 221-250, 1986.
- [7] G. Gohorianu, « Interaction entre les défauts d'usure et la tenue en matage d'assemblages boulonnées en carbone/époxy ». *Thèse de doctorat, Université Toulouse III*, 2008.
- [8] J.Y. Cognard, R. Créac'hacdec, L. Sohier, P. Davies, « Analysis of the nonlinear behavior of adhesives in bonded assemblies – Comparison of TAST and Arcan tests ». *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2008.
- [9] Dean G., L. Crocker, B. Read, L. Wright, « Prediction of deformation and failure of rubbertoughened adhesive joints ». *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2004.

- [10] F.-X. Irisarri, N. Carrère, F. Laurin, J.-F. Maire, « Analyse multiéchelles et multiniveaux des structures composites boulonnées ». 16<sup>ème</sup> *Journées Nationales sur les Composites*, Toulouse, France, 10-12 juin 2009.
- [11] P.S. Wu, C.T. Sun, « Modeling bearing failure initiation in pin-contact of composite laminate », *Mechanics of Materials* Vol. 29, pp. 325-335, 1998.
- [12] G. Kelly, S. Hallström, « Bearing strength of carbon fibre/epoxy laminates: effects of bolt-hole clearance », *Composites part B: Engineering*, Vol. 35, pp. 331-343, 2004.