

REPAERO_COS

TITRE

Méthodologie de prédiction de la tenue nominale de réparations aéronautiques composite par collage structural

Ces travaux de thèse seront cofinancés par l'ISAE-SUPAERO.

Ces travaux de thèse seront réalisés en collaboration avec les laboratoires d'essais de DGA TA.

PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

Une réparation structurale consiste généralement à enlever de la matière autour de la zone endommagée (fissure de fatigue, impact, corrosion...) puis à rajouter de la matière saine. Le rajout de matière saine est réalisé par un assemblage. Les méthodes d'assemblage, dites classiques, sont le boulonnage, le collage et l'assemblage hybride (boulonné / collé). La matière saine rajoutée peut être réalisée dans un matériau différent de la matière initiale, menant à la présence d'interfaces multimatériaux (composite, métallique) qu'il s'agit de maîtriser.

Aujourd'hui l'aviation civile n'a pas recours aux réparations collées pour des applications structurales. Pourtant le collage est une technologie d'assemblage qui offre des rapports tenue sur masse significativement plus élevés que la technologie d'assemblage par boulonnage utilisée. Les principaux verrous sont les suivants : (i) le dimensionnement d'un joint collé et (ii) l'assurance que le collage a bien été réalisé [1]. Il n'existe pas aujourd'hui de norme permettant de dimensionner les assemblages collés, contrairement aux assemblages boulonnés. Le dimensionnement pose la question de la caractérisation du comportement mécanique (protocoles expérimentaux, type d'essais...) permettant de définir des critères de tenue et les données d'entrée nécessaire à ces critères. De plus, il s'agit ensuite de définir les outils de calcul adaptés pour calculer les critères de tenue souhaitée. En termes de procédé de fabrication, il est aujourd'hui économiquement non viable et technique encore difficile d'assurer que les forces de d'adhésion et de cohésion ont bien été installées afin de réaliser le joint – contrairement au boulonnage pour lequel un simple contrôle visuel est souvent suffisant. Une action de coopération européenne (COST), baptisée CERTBOND, a été lancée au printemps 2019 afin de certifier les structures primaires collées [2]. Le développement de moyens de contrôle non destructif, pour détecter certains défauts par choc laser comme les « kissin'bond », fait l'objet de travaux de recherche (FUI COMPOCHOC). Une autre approche est de tirer avantage des nouvelles technologies pour assurer la robustesse et la fiabilité du procédé de collage pour s'affranchir à terme des contrôle non destructif coûteux (FUI S3PAC). [Ce sujet de thèse adresse le verrou du dimensionnement mécanique.](#)

Sur le périmètre des méthodes d'assemblage classiques, les deux problématiques majeures identifiées post réparation concernent la prédiction de :

- la tenue nominale (statique, fatigue, durabilité).
- la tenue en environnement sévère (vulnérabilité, impact, crash).

L'objectif commun à ces deux problématiques consiste à définir des méthodologies de prédiction de [tenue nominale et à l'épreuve du temps](#). Afin de prédire une tenue nominale, il est nécessaire d'évaluer un critère calculé à une valeur de conception mesurée. Les formes de critères doivent être définies théoriquement et/ou expérimentalement et peuvent être pondérées par des retours d'expérience en service. Les admissibles sont mesurés expérimentalement en lien avec les critères définis. Pour estimer les critères, il est nécessaire de disposer d'outils de calcul, à partir de données d'entrée. Ces données d'entrée sont les propriétés géométriques, matérielles et les conditions aux limites en termes de déplacements et d'efforts. La méthodologie de prédiction intègre l'ensemble de cette démarche, soit les deux volets (i) [le comportement mécanique](#) (essais expérimentaux et modélisation du comportement) et (ii) [la simulation numérique](#) (modélisation et essais numériques).

PROGRAMME DE LA THÈSE

Afin de concevoir une réparation les ingénieurs des bureaux d'étude ont recours à la simulation numérique. Selon l'objectif attendu de la simulation servant un objectif de conception, des hypothèses de modélisation spécifiques peuvent être prises. Selon ces hypothèses, des méthodes de résolution variées, telles qu'analytiques, semi-analytiques ou numériques avancées incluant différents niveaux de représentation, peuvent être utilisées. Afin de réduire les temps de conception directement dépendant des temps de simulation numérique, il est nécessaire de savoir quel type de résolution est adapté au problème de conception souhaité. La problématique scientifique de la thèse consiste alors à **définir le niveau de modélisation nécessaire pour représenter les mécanismes physiques du comportement mécanique de la réparation**, incluant ceux relatifs à la rupture sous ses différents modes.

Afin d'adresser cette problématique, nous analyserons les prédictions du comportement mécanique en faisant varier les hypothèses simplificatrices de manière progressive des plus contraignantes aux moins contraignantes. Cette analyse sera basée sur la corrélation entre les résultats des essais expérimentaux et numériques. Une fois l'adéquation entre niveau de simulation et phénomènes physiques comprise, il s'agira de proposer des schémas de résolution permettant de réduire les temps de calcul. Des modélisations simplifiées basées sur un schéma de résolution semi-analytique – technique par **macro-élément (ME)** – ont déjà été développées par l'équipe de recherche. La thèse de Benjamin Ordonneau actuellement en cours (projet « SCODYN » sous cofinancement DGA et CETIM) doit quant à elle fournir la brique élémentaire en cinématique de plaque autorisant alors des chargements multi-axiaux. La technique de résolution par ME permet de simuler le comportement mécanique pour diverses configurations géométriques d'assemblage multimatériaux collées et/ou boulonnées [3]. Enfin, bien que les capacités de calcul soient de plus en plus importantes, chercher à réduire les temps de calcul reste toujours un enjeu dans le cadre de calculs statistiques ou d'algorithmes d'optimisation [4]. Sur la base des modélisations simplifiées validées, la conception fiable et la conception optimale formeront les deux cas de démonstration de ces travaux de thèse. La sensibilité des différents paramètres de conception pourra être étudiée grâce à des plans d'expérience numériques afin d'évaluer la robustesse de la solution de réparation et de produire in fine un **méta-modèle fiabiliste prédictif**. De plus, **des schémas d'optimisation** permettront d'explorer l'espace de conception et de proposer des solutions de conception de réparation alternatives ou innovantes.

La prédiction de la tenue des réparations couvre un large périmètre. Le périmètre propre à cette thèse est donc restreint et couvre :

- les réparations de pièces composites par un matériau composite
- un matériau composite unidirectionnel (T800S/M21) et un tissé (G939/M18)
- la tenue initiale de la réparation saine, endommagée, réparée et vieillie sous sollicitation statique (traction, compression, cisaillement)

La tenue à la fatigue à la fatigue pourra être abordée, en guise de perspective. De plus, les travaux de thèse concerneront :

- la modélisation du comportement sur la base de résultats des essais expérimentaux
- la modélisation et la simulation numérique

Le laboratoire d'essais de la DGA TA concevra et réalisera les essais expérimentaux sur les éprouvettes élémentaires de caractérisation et fournira les résultats.

L'éprouvette technologique visée est un panneau raidi métallique. La réparation sera un patch composite. Cette thèse adresse alors les deux premiers niveaux de la pyramide des essais.

Les résultats des travaux de thèse pourront s'appliquer tant à l'aviation militaire que civile. Les autres secteurs d'activités des transports ainsi que celui de la construction peuvent être concernés.

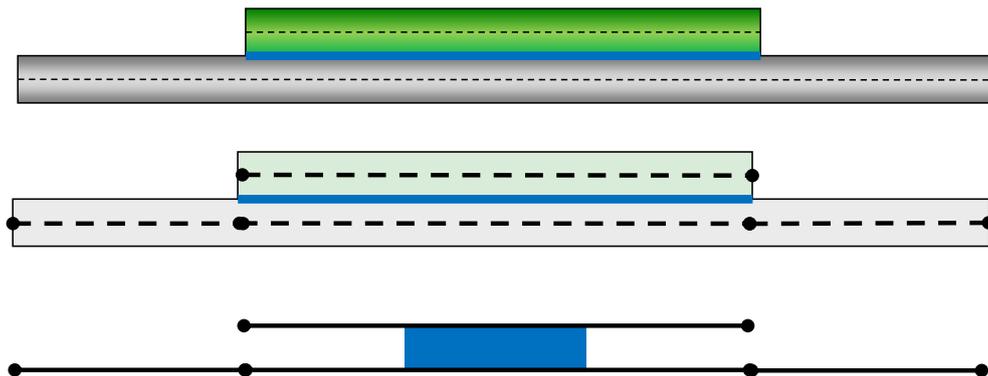


Figure 1. Technique par macro-élément

Le projet comportera 4 tâches principales.

Tâche 1 – Bibliographie et Problématique

Cette tâche vise, dans un premier temps, à permettre au doctorant(e) de prendre en main le contexte de la thèse au travers (i) d'une étude bibliographique, (ii) de l'analyse des résultats d'essais expérimentaux disponibles à DGA TA et (iii) de la réalisation d'essais numériques sur la base de modélisations déjà développées par l'équipe de recherche. Dans un second temps, une synthèse sera effectuée afin de fournir les plans de développement et réalisations des essais numériques et expérimentaux. Les besoins en analyse bibliographique tout au long de la thèse seront réalisés dans le cadre de cette tâche.

Tâche 2 – Développement et validation des modélisations

Cette tâche consiste à développer les modélisations des plus élémentaires ou plus raffinées. Les validations seront réalisées sur la base de la confrontation des résultats des essais numériques avec les résultats des essais expérimentaux. Une ou des modélisations simplifiées éprouvées et pertinentes seront alors proposés. Les modélisations les plus complexes utiliseront la résolution par la méthode des Éléments Finis. Une modélisation du comportement des stratifiés développée depuis 20 ans par l'équipe de recherche sera utilisée pour décrire la rupture progressive de la matrice et des fibres [5]. Des essais expérimentaux de caractérisation élémentaire pourront être réalisés par le doctorant à l'ICA afin de compléter les résultats fournis par DGA TA et d'alimenter la loi matériau. Les modélisations simplifiées pourront utiliser la technique par ME développée depuis 15 ans par l'équipe de recherche, et en particulier le ME de plaques collées en cours de développement dans le cadre de la thèse de Benjamin Ordonneau. Ces développements s'appuient sur l'utilisation de série entière qui a l'avantage de pouvoir considérer des gradients de propriétés des substrats et de l'adhésif sans avoir recours à un maillage pour un calcul linéaire élastique [6].

Tâche 3 – Conception fiable et conception optimale

L'utilisation de l'approche de modélisation simplifiée (tâche 2) permettra de fournir un méta-modèle fiable prédictif ainsi que de rechercher des solutions de conception optimale. Une confrontation à des résultats expérimentaux est attendue. Il est indiqué que cette tâche consistera à utiliser des méthodologies déjà existantes, sur la base des conclusions d'une synthèse bibliographique (Tâche 1). Pour la conception fiable, l'idée est (i) de pouvoir prédire une tenue en fonction des incertitudes géométriques, matérielles et (ii) de chargement ainsi que de fournir un niveau de confiance dans le design proposé (cela pourrait aider à la certification). Pour la conception optimale, il s'agit de proposer des designs de réparation innovants : formes non conventionnelle des patches et orientation des plis ; des projets d'élèves sont déjà en cours sur le sujet dans le contexte de la fabrication additive de TP chargés de fibres longues. Si opportun des essais expérimentaux de démonstrations pourront être réalisés par le doctorant.

Tâche 4 – Rédaction et présentation

Cette tâche est transverse. Elle regroupe l'ensemble des productions écrites (mémoire, articles, conférences) et orales (conférences, soutenances).

[1] Feuille de route nationale. Vers la maîtrise des Assemblages Collés Structuraux. Aerospace Valley, Astech, Pégase, EMC2 (2014).

[2] CERTBOND, COST Action, CA18120, <https://www.cost.eu/actions/CA18120/#tabs|Name:management-committee>

[3] Paroissien, E., 2006. Contribution aux assemblages hybrides (boulonnés/collés) – Application aux jonctions aéronautiques. PhD Dissertation, University of Toulouse III, November 2006, 286 p., on line <http://thesesups.ups-tlse.fr/3/>

[4] Askri, R., Bois, C., Wargnier, H., Lecomte, J., 2016. A reduced fastener model using Multi-Connected Rigid Surfaces for the prediction of both local stress field and load distribution between fasteners. *Finite Elem Anal Des*, 110, 32–42.

[5] Montagne, B., Lachaud, F., Paroissien, E., Martini, D., Congourdeau, F., 2020. Failure analysis of single lap composite laminate bolted joints: comparison of experimental and numerical tests. *Composite Structures*, 238, 111949 [DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111949]

[6] Ordonneau, B., Paroissien, E., Salaün, M., Malrieu, J., Guigue, A., Schwartz, S., 2020. A methodology for the computation of the macro-element stiffness matrix for the stress analysis of a lap joint with functionally graded adhesive properties. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 97, 102505 [DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2019.102505]

PROFIL

Ingénieur ou master 2 en mécanique des matériaux ou structures avec un goût pour la simulation numérique.

CONTACT

Envoyer une candidature motivée (CV+LM) à Frédéric Lachaud et Éric Paroissien par e-mail : frederic.lachaud@isae-supaero.fr et eric.paroissien@isae-supaero.fr.

LABORATOIRE D'ACCUEIL

Le laboratoire d'accueil est l'Institut Clément Ader (ICA), à Toulouse, CNRS UMR 5312, au sein de l'axe transverse Assemblages (ASM) et des groupes Modélisation des Systèmes et Microsystèmes Mécaniques (MS2M) et Matériaux et Structures Composites (MSC).

DUREE

36 mois à partir de l'automne 2020

REMUNERATION

Selon la grille de rémunération ISAE-SUPAERO (indice 437). Possibilité de bénéficier d'un contrat de monitorat, en complément.