

Méthodologie de prédiction de la tenue après impact de réparations aéronautiques composite par collage structural

contact : frederic.lachaud@isae-supaero.fr, eric.parosisien@isae-supaero.fr, sebastien.schwartz@isae-supaero.fr

1. CONTEXTE

La thèse proposée s'inscrit dans le cadre du projet [RepAero_COS_2](#).

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. Ce 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. Les principaux verrous sont les suivants : (i) l'assurance que le collage a bien été réalisé et (ii) le dimensionnement d'un joint collé. 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, etc...) 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 évaluer les critères de tenue sélectionnée. En termes de procédé de fabrication, il est aujourd'hui économiquement non viable et techniquement encore difficile d'assurer que les forces de d'adhésion et de cohésion ont bien été mise en œuvre lors de la réalisation du 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. D'après [\[Baker et al. 2015\]](#) [\[Zhou et al. 2021\]](#), la certification des réparations collées structurales est rendue difficile du fait du manque de méthodes de contrôle non destructif (premier verrou). Quand, par exemple, des contraintes d'écoulement aérodynamiques sont à considérer, les réparations de type biseauté, ou en escalier, apparaissent comme idéales. D'un point de vue calcul, elles sont complexes et demandent un effort de modélisation expérimentale et numérique particulier, en particulier, du fait de la graduation de leurs propriétés (second verrou) [\[Orsatelli et al. 2023\]](#) [\[Orsatelli et al. 2024a-b\]](#).

Le projet [RepAero_COS_2](#) s'inscrit principalement dans le second verrou du dimensionnement et fait suite au projet [RepAero_COS_1](#) (thèse de Jean-Baptiste Orsatelli). 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 alors à définir des méthodologies de prédiction de tenue nominale et à l'épreuve du temps.

2. OBJECTIFS

Le projet **RepAero_COS_2** vise à terme à développer **une plateforme d'essais expérimentaux et numériques** pour la prédiction de la tenue après impact de réparations collées composites. Cette plateforme intégrera en particulier une méthodologie, à développer en amont et applicable en bureau d'études, de prédiction robuste de la tenue après impact de réparations collées composites. Dans le cadre de ce projet, les impacts basse vitesse (quelques m.s-1) basse énergie (200 J maximum) représentatifs d'impacts d'outils en atelier ou de grêlons seront considérés.

Afin de prédire une tenue, il est nécessaire d'évaluer un critère calculé et de le comparer à une valeur de conception mesurée. Les formes de critère 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 alimentés par des données d'entrée. Ces données d'entrée sont les propriétés géométriques, matérielles et les conditions aux limites. Une méthodologie de prédiction comprend alors 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). Deux scénarios génériques sont considérés lors de l'impact : soit la réparation collée est chargée en tension soit la réparation n'est pas chargée en tension. Les tenues après impact considérées sont les tenues en statique. Le scénario d'impact multiples et la tenue résiduelle en fatigue sont vus dans le cadre ce projet comme des ouvertures possibles et seront abordés en tant que tels.

Le premier objectif associé à ces travaux en amont est de comprendre le comportement mécanique jusqu'à la ruine de réparations collées composite impactés sous chargement statique. Différents scénarios d'impacts pourront être définis et testés. L'approche consistera en la réalisation d'essais expérimentaux et d'essais numériques. L'approche duale numérique et expérimentale considérera à la fois différents niveaux de modélisations, des plus simples au plus riches (échelle pyramidale), et différentes géométries d'éprouvettes, des plus simples à fabriquer à la géométrie cible.

Le second objectif est de proposer, en tout état de conscience et avec un certain niveau de représentativité, des modélisations dégradées ou simplifiées, à schéma de résolution éventuellement dédié, comme la modélisation par macro-élément [Paroissien et al. 2022] [Schwartz et al. 2024a-b]. L'analyse des prédictions issues des différentes modélisations permettra de qualifier leur fidélité au regard de la réalité physique.

Sur la base d'un choix de modèles prédictifs adéquats supporté par l'analyse précédente, le troisième objectif est alors la recherche de solutions de conception optimale ou de solutions de réparation innovantes : formes non conventionnelles ou graduées des patchs et orientation des plis. Ces modélisations dégradées pourront aussi être utilisées pour prédire une tenue en fonction (i) 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).

L'aspect innovant réside dans l'approche proposée pour assurer la robustesse des prédictions de tenue après impact : graduation duale maîtrisée entre richesse des modélisations et fidélité de la représentativité physique. Le concepteur en bureau d'étude pourra choisir en fonction des caractéristiques matériaux le type de modélisation et niveau de fidélité. De plus, il pourra concevoir des essais expérimentaux à l'aide du jumeau numérique du banc d'essai augmenté des modélisations du comportement mécanique.

Le premier résultat attendu est une plateforme d'essais expérimentaux et numériques pour la tenue après impact de réparations collées composite ; autrement dit, un banc d'essai expérimental jumelé à un environnement numérique permettant la conception et le traitement des essais expérimentaux. L'environnement numérique pourra être enrichi au fur et à mesure des études réalisées sur cette plateforme. Le second résultat attendu est la description et la compréhension des mécanismes d'endommagement jusque rupture. Le troisième résultat attendu est de permettre l'identification, en fonction du besoin exprimé en termes de fidélité à la réalité physique, des modélisations et essais de caractérisation expérimentale nécessaires pour alimenter les modèles. En corollaire, des géométries d'éprouvettes simplifiées mais représentatives de la réparation réelle pourraient être définies. Le quatrième résultat attendu est la proposition de solutions de réparations innovantes.

3. ENVIRONNEMENT

RepAero_COS_2 est cofinancé par l'[AID](#) et par l'[ISAE-SUPAERO](#). La thèse de doctorat du projet RepAero_COS_2 sera préparée au sein de l'[ICA](#) dans les groupes (axes) MS2M (MOON) et MSC (SIMU) et portée par l'[axe transverse ASM](#). Le candidat ou la candidate sera inscrit(e) à l'Ecole Doctorale [MEGEP](#).

RepAero_COS_2 s'inscrit dans le cadre de la Convention Spécifique « Réparations Multimatériaux » entre ISAE-SUPAERO et [DGA-TA](#). Cette collaboration porte sur la conception et le dimensionnement des réparations multimatériaux utilisant les technologies d'assemblage par collage, boulonnage ou hybride (boulonnée / collée). La thèse de Jean-Baptiste Orsatelli (2024) du projet RepAero_COS a été portée par cette Convention Spécifique. OVERCOME utilisera les matériaux fournis par DGA-TA pour la partie applicative.

4. CANDIDATURE

Niveaux d'études M2 ou Diplôme d'Ingénieurs

Compétences Matériaux polymère, composite et métallique [\[fondamentaux\]](#)
Mécanique des structures [\[avancé\]](#)
Mécanique numérique [\[fondamentaux\]](#)
Mécanique expérimentale [\[fondamentaux\]](#)

Procédure CV + LM + notes à adresser par mail à : frederic.lachaud@isae-supaero.fr, eric.paroissien@isae-supaero.fr, sebastien.schwartz@isae-supaero.fr

Ne pas hésiter à prendre contact pour plus de renseignements

Démarrage automne 2025

Rémunération Environ 2100 € net par mois

5. RÉFÉRENCES

[Baker et al. 2015] Baker A, Gunnion AJ, Wang CH. On the certification of Bonded Repairs to Primary Composite Aircraft Components. J Adhes 2015;91(1-2):4–38. <https://doi.org/10.1080/00218464.2014.883315>

[Orsatelli et al. 2023] Orsatelli, J.B., Paroissien, E., Lachaud, F., Schwartz, S., 2023. Bonded flush repairs for aerospace composite structures : a review on modelling strategies and application to repairs optimization, reliability and durability. Composite Structures, 304, 116338. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116338>

[Orsatelli et al. 2024a] Orsatelli, J.B., Paroissien, E., Lachaud, F., Schwartz, S., 2024. Influence of modelling hypotheses on strength assessment of CFRP stepped repairs. International Journal of Adhesion and Adhesives, 132, 103682. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103682>

[Orsatelli et al. 2024b] Orsatelli, J.B., Paroissien, E., Lachaud, F., Schwartz, S., 2024. Experimental and numerical multiscale testing of CFRP bonded stepped repairs. Thin-Walled Structures, in press, 112764. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112764>

[Paroissien et al. 2022] Paroissien, E., Lachaud, F., Schwartz, S., 2022. Modelling load transfer in single-lap adhesively bonded and hybrid (bolted / bonded) joints. Progress in Aerospace Sciences, 130, 100811. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2022.100811>

[Schwartz et al. 2024a] Schwartz, S., Paroissien, E., Lachaud, F., 2024. An enriched finite element for the simplified stress analysis of an entire bonded overlap : continuum macro-element. International Journal of Adhesion and Adhesives, 129, 103571. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103571>

[Schwartz et al. 2024b] Schwartz, S., Paroissien, E., Lachaud, F., 2024. Extended formulation of macro-element based modelling – Application to single-lap bonded joints. Computers and Structures, 305, 10789. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2024.107589>

[Zhou et al. 2021] Zhou W, Ji X-I, Yang S, Liu J, Ma L-H. Review on the performance improvements and non-destructive testing of patches repaired composites. Compos Struct 2021;263:113659. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113659>