

## OFFRE DE THESE DE DOCTORAT

### TITRE

Méthodologies pour la simulation rapide et fiable de structures collées multi-couches sous sollicitation dynamique

### CONTEXTE

Les assemblages sont le point critique de toutes les industries de construction. Au-delà de permettre la construction de systèmes mécaniques complexes, il en assure la durée de vie, du fait qu'ils ont pour fonction d'assurer le transfert des efforts au sein des structures. Bien qu'utilisé depuis des millénaires, le collage peut être regardé comme une technologie récente d'assemblage. En effet, depuis les années 50, le collage bénéficie **des avancées de la chimie** avec l'apparition de nouveaux polymères qui permettent des collages inenvisageables jusqu'à présent. Le collage est une technologie d'assemblage polyvalente permettant d'envisager des **assemblages multimatériaux**.

Comparée à la technologie d'assemblage par boulonnage, l'assemblage par collage offre **des performances mécaniques accrues tout en réduisant la masse embarquée** nécessaire au transfert des efforts. Cette technologie intéresse donc particulièrement les industries aéronautiques, spatiales, ferroviaires ou automobiles, pour lesquelles le rapport résistance sur masse est un enjeu majeur. Afin de maîtriser le collage structural, l'initiative nationale **MACS « Vers la Maîtrise des Assemblages Collés Structuraux »** a été déployée depuis 2009, regroupant industriels et laboratoires de recherche. Par ailleurs, à l'initiative de deux EC de l'ISAE-SUPAERO et d'une EC de l'ENSIACET, une collaboration entre l'axe transverse Assemblage de l'Institut Clément Ader et l'axe transverse Adhérence du CIRIMAT est née, afin de créer un pôle toulousain dédié au collage structural : **TACCOS** pour **« Toulouse Adhésion Cohésion Collage Structural. De la Chimie à la Mécanique. »**

Le sujet proposé s'inscrit dans un des verrous identifiés par MACS, à savoir la modélisation et la simulation des assemblages collés structuraux et viendra supporter l'initiative TACCOS. Il s'agit de développer des méthodologies permettant de **réduire les temps de calcul tout en prenant en compte le comportement réel de l'adhésif pour une meilleure représentativité de la simulation du comportement mécanique sous sollicitation dynamique à l'échelle de la structure**.

Les applications industrielles de ces travaux intéressent aussi bien les phases de conception en bureau d'étude que le suivi en service des produits. En particulier, ce sujet s'inscrit dans une demande d'outils numériques performants pour le traitement des réparations structurales.

Ces travaux de thèse seront cofinancés par le CETIM.

### DESCRIPTION

Dans le cadre de la thèse de **[Paroissien 2006]** portant sur la prédiction du comportement mécanique des assemblages hybrides boulonnés / collés, une modélisation originale, sur la base de macro-éléments (ME) représentant les recouvrements collés, a été proposée. Ce ME est une brique dont les 4 nœuds sont situés sur les lignes moyennes des substrats et qui intègre la couche de colle qui les lie. A la différence des éléments finis, la méthodologie proposée ne repose pas sur des fonctions de forme polynômiales. Au contraire, celles-ci sont choisies comme les solutions du système d'équations différentielles, issues des équations constitutives et des équations d'équilibre local. La conséquence

en est qu'il n'est pas nécessaire de mailler le recouvrement pour approcher la solution. Un seul ME est suffisant pour tout un recouvrement collé, de sorte **que les temps de calcul sont considérablement réduits tout en conservant une bonne représentativité du comportement mécanique**. Les premiers développements ont été réalisés sous une cinématique unidimensionnelle de barre ( $4 \times 1 = 4$  ddl) ou de poutre dans le plan ( $4 \times 3 = 12$  ddl). Entre 2007 et 2016, de nombreux développements ont permis d'étendre les champs d'application de l'approche [Paroissien et al. 2013]. En particulier, il est désormais possible (i) de considérer l'assemblage de deux poutres différentes et possiblement stratifiées ainsi que (ii) des comportements non linéaires adhésifs tels qu'élastoplastiques, viscoélastiques ou endommageants [Lélias 2016], sous chargement statique. En 2012, Stapleton a utilisé ce concept de modélisation par ME 1D pour modéliser des éléments structuraux de géométrie complexe [Stapleton 2012].

Une limitation forte de ces ME est leur cinématique unidimensionnelle, puisque leur application ne concerne que les essais de caractérisation en laboratoire ou des cas d'application structurale de jonctions longues. De plus, seules des analyses statiques linéaires et non linéaires par calcul implicite sont aujourd'hui disponibles. L'objectif de cette thèse est de dépasser ces deux limitations.

Dans un premier temps, il s'agira de développer et d'implémenter une analyse dynamique dans le cadre de la modélisation par ME 1D. Les matrices de masse des ME en cinématique de barres et de poutres seront alors formulées. Des algorithmes de résolution explicites et implicites dédiés seront implémentés. Cette première étape permettra au doctorant à la fois de se familiariser avec la modélisation par ME ainsi qu'avec le calcul en dynamique et d'apporter la brique manquante à la simulation en dynamique d'éprouvette à l'échelle technologique. A l'image de la caractérisation statique des joints adhésifs, cette brique pourra être utilisée pour la caractérisation du comportement mécanique par dialogue essai / calcul. En particulier, un cas d'utilisation concret pourrait être l'élaboration d'une stratégie d'identification de la réponse en amortissement. Dans un second temps, il s'agira de développer une ou plusieurs méthodologies pour la formulation des matrices de raideur et de masse d'un ME à 40 ddl de recouvrement collé, sous une cinématique de plaques. L'intérêt est de pouvoir étendre la méthodologie par ME à la modélisation et à la simulation de structures minces (3D). A notre connaissance, deux approches ont été publiées à ce jour sur la formulation d'éléments finis spéciaux représentant à la fois les substrats et la colle [Andruet et al. 2001] [Schmidt and Edlund 2010]. Néanmoins, ces approches postulent la forme des fonctions utilisées, de sorte qu'un maillage reste nécessaire même en calcul élastique linéaire. Enfin, il s'agira d'implémenter l'algorithme nécessaire au calcul dynamique.

Cette thèse permettra donc de compléter les méthodologies disponibles pour le traitement des différentes échelles de la pyramide des essais par simulation numérique.

- [Andruet et al. 2001] RH Andruet, DA Dillard, SM Holzer. Two- and three-dimensional geometrical nonlinear finite elements for analysis of adhesive. *Int J Solids Structures*, 21 (2001) 17-34
- [Lélias 2016] G Lélias, Adhesively Bonded Joints: Modeling, Simulation and Experimental Characterization. Mémoire de thèse de doctorat, Université de Toulouse III, ICA, ISAE-SUPAERO (2016)
- [Paroissien 2006] E Paroissien, Contribution aux Assemblages Hybrides (Boulonnés/Collés) – Application aux Jonctions Aéronautiques, Mémoire de thèse de doctorat, Université de Toulouse III, IGM, Novembre 2006, on line <http://thesesups.ups-tlse.fr/3/> (2006)
- [Paroissien et al. 2013] E Paroissien, F Lachaud, T Jacobs, A Simplified Stress Analysis of Bonded Joints using Macro-Elements, In the book: *Advances in Modeling and Design of Adhesively Bonded Multilayered Systems*. Editors: K.L. MITTAL and S. KUMAR, Wiley Eds., Chapter 4, pp. 93-146 (2013)
- [Schmidt and Edlund 2010] P Schmidt, U Edlund. A finite element method for failure analysis of adhesively bonded structures. *Int J Adhesion Adhesives* 3 (2010) 665-681
- [Stapleton 2012] SE Stapleton. The analysis of adhesively bonded advanced composite joints using joint finite elements. PhD thesis. University of Michigan (2012)

## PROFIL

Cette offre s'adresse à des étudiant(e)s titulaires d'un Bac + 5 (M2 ou Ecole d'ingénieurs) en Mécanique des Structures et/ou Mathématiques Appliquées. Les compétences attendues sont :

- maîtrise des méthodes pratiques (analytiques et numériques) de résolution des équations aux dérivées partielles
- maîtrise de la méthode Eléments Finis (il n'est pas demandé de maîtriser un logiciel de calcul)
- *notions* de Résistance des Matériaux

Les logiciels de calcul scientifique MATLAB ou SCILAB ainsi que des langages de programmation FORTRAN ou PYTHON ou autres pourraient être utilisés pour les développements numériques.

Il est attendu que les candidat(e)s puissent démontrer grâce à leurs expériences passées leur capacité à :

- s'organiser et communiquer
- apprendre et synthétiser
- s'investir sur des sujets nouveaux

## LABORATOIRE D'ACCUEIL

Le laboratoire d'accueil est l'Institut Clément Ader (ICA), CNRS UMR 5312, au sein du groupe Modélisation des Systèmes et Microsystèmes Mécaniques (MS2M), à Toulouse.

## DUREE

36 mois à partir de l'automne 2018

## REMUNERATION

Selon la grille de rémunération ISAE-SUPAERO (indice 437).

Possibilité de bénéficier d'un contrat de monitorat, en complément.

## CONTACT

Les candidatures motivées doivent être adressées dans le même courriel aux deux personnes suivantes:

- PAROISSIEN Eric, [eric.paroissien@isae-supaero.fr](mailto:eric.paroissien@isae-supaero.fr), 05.61.33.84.38
- SALAÜN Michel, [michel.salaun@isae-supaero.fr](mailto:michel.salaun@isae-supaero.fr), 05.61.33.85.83