

# MIAM

## TITRE

**MASTIC FONCTIONNALISÉ POUR L'AMÉLIORATION DE LA PERFORMANCE MÉCANIQUE DES ASSEMBLAGES BOULONNÉS DÉMONTABLES (MIAM)**

*Ces travaux de thèse seront réalisés dans le cadre d'une collaboration entre ICA (UMR CNRS 5312), LGP (EA 1905) et CIRIMAT (UMR CNRS 5085).*

## PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

Ce projet s'inscrit dans l'initiative **TACCOS (Toulouse Adhésion Cohésion Collage Structural)** qui vise à **l'émergence d'un pôle pluridisciplinaire physico-chimico-mécanique toulousain** afin de répondre aux questions levées par le collage structural.

Dans le cadre de la conception des structures, le choix des technologies d'assemblage est prépondérant puisque ces dernières sont garantes de l'intégrité du système fabriqué. Si la solution d'assemblage par boulonnage se présente comme la solution de confiance pour les concepteurs, il n'en reste pas moins qu'elle est peu performante mécaniquement en termes de ratio tenue sur masse. La technologie d'assemblage hybride (boulonné/collé) – HBC – peut être vue comme une solution d'amélioration de la performance mécanique des assemblages boulonnés par l'utilisation d'une colle judicieusement choisie pour un fonctionnement synergétique.

Il s'agit ici de développer une méthodologie de caractérisation et modélisation expérimentale et numérique de matériaux élastomères en fatigue fluage. Cette méthodologie vient en support à la formulation par fonctionnalisation des propriétés de cohésion et d'adhérence de mastics aéronautiques, afin d'augmenter le ratio tenue en fatigue sur masse de la liaison boulonnée.

Sur les avions civils, le collage est utilisé depuis la fin de la seconde guerre mondiale ([Higgins 2000](#)). Néanmoins, sur les structures primaires le collage est accompagné de fixations mécaniques, afin de remplir les exigences certificatives concernant la tolérance aux dommages – autrement dit, démontrer la tenue à charge limite si la liaison est 100% décollée. Cette stratégie de conception est appelée "waiting fail safe". Par conséquent, aujourd'hui sur avion un assemblage primaire collé est forcément HBC et utilise des adhésifs structuraux. Cette stratégie "waiting fail safe" n'offre pas d'amélioration du ratio tenue sur masse sous sollicitation statique ([Hart-Smith 1985](#)), puisqu'un transfert total des efforts est assuré par la colle. Les efforts transférés par les fixations dans un assemblage HBC peuvent être estimés à l'aide d'un modèle analytique présenté dans ([Paroissien 2006](#)). A partir des prédictions de ce modèle analytique, il est possible de définir une classe de colle dite à « haut module » pour laquelle les efforts sont transférés par la colle ([Figure 1](#)), correspondant donc à la stratégie de conception "waiting fail safe". La classe de colle dite à « module intermédiaire » permet un transfert des efforts synergétique entre les fixations et la colle. Une conséquence fondamentale est qu'un chemin d'effort supplémentaire existe, correspondant alors à une stratégie de conception appelée "fail safe" et la possibilité de réduire le nombre de fixations donc la masse (et le coût) est offerte. Par exemple, d'après la prédiction du modèle analytique, une colle ayant un module de cisaillement de 3 MPa conduit à un transfert de 36 % de la charge par des deux fixations, correspondant à la charge reprise par les fixations externes pour une jonction boulonnée à trois fixations. En termes de tenue statique, des gains significatifs ont été obtenus en utilisant des colles dites flexibles ([Kelly 2004](#), [Paroissien et al. 2017](#)). Ces colles (polyuréthane, méthacrylate) présentent des raideurs initiales importantes ainsi que la capacité à se déformer, en accommodant les contraintes. Elles peuvent être alors classées dans la catégorie des colles à module

intermédiaire au sens d'Adams et Mallick (Adams et Mallick 1993). Pour des applications aéronautiques, la tenue à la fatigue des assemblages boulonnés est en général dimensionnante et entraîne une multiplication des fixations mécaniques. Ainsi, au regard de la tenue statique, l'assemblage boulonné est surdimensionné. En 1966, Hartman montre des gains significatifs en fatigue sur une jonction aluminium en simple cisaillement boulonnée en remplaçant le mastic d'interposition par une colle époxy (Hartman 1966). En 2004, Kelly montre aussi des gains en fatigue avec une colle flexible polyuréthane pour application automobile obtenus pour un assemblage composite HBC en simple cisaillement comparé à sa version purement collée (Kelly 2004). En 2006, sur une configuration double cisaillement aluminium, il a été montré qu'en utilisant la colle polyuréthane de Kelly à la place du mastic d'interposition, il était possible de réduire le nombre de fixations d'un tiers tout en augmentant significativement la tenue en fatigue (Paroissien 2006). La présence de la colle permet de décharger les fixations et par suite de réduire les surcontraintes en bord de trou, sensible à la fatigue. De nombreuses autres publications démontrent l'intérêt mécanique des assemblages HBC, comme par exemple (Kweon et al. 2006, Bodjona et al. 2015, Choi et al. 2017, Lim et al. 2018).

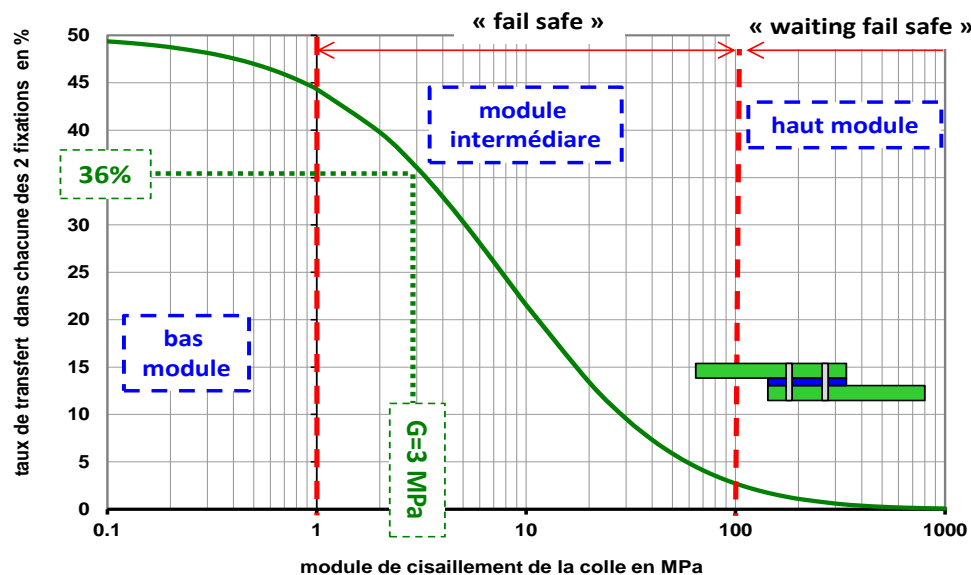


Figure 1 – Taux de transfert aux fixations en fonction du module de cisaillement de colle prédit par un modèle analytique pour un simple recouvrement HBC à 2 lignes de fixations.

Un choix judicieux de colle pour une conception "fail safe" ou synergétique oriente vers des colles à module intermédiaire. Pour une application aéronautique structurale, sujette à un dimensionnement en fatigue, une idée est de fonctionnaliser un mastic d'interposition déjà utilisé (donc certifié) et de lui conférer une fonction structurale qu'il puisse maintenir dans le temps sous sollicitation cyclique. Or, les mastics sont des matériaux élastomères et ont un comportement viscoélastique incompressible en transformation finie, possiblement plastique et endommageable. Leur comportement est donc dépendant de la vitesse de sollicitation et de la température. De plus, l'incompressibilité implique un traitement découplé des propriétés déviatoriques et sphériques. Dans le cas d'une couche de mastic, les propriétés déviatoriques pilotent le transfert des efforts tandis que les propriétés sphériques devront s'opposer à l'ouverture des deux plaques. Une répartition de contrainte de cisaillement homogène est attendue alors que les contraintes de pelage présenteront de forts gradients en bord. Autrement dit, un fonctionnement synergétique sera obtenu à condition que, sous une sollicitation de fatigue fluage, (i) la raideur et la résistance en cisaillement et que (ii) la ténacité en mode d'ouverture soient conservées à un niveau suffisant dans le temps. La caractérisation du comportement mécanique statique des élastomères est bien décrite dans la

littérature ([Austrell 1997](#), [Saad 2003](#)) et requiert une démarche expérimentale lourde. Par contre, la caractérisation en fatigue, qui plus est fluage, est bien moins documentée. De plus, la caractérisation de la résistance statique et en fatigue des élastomères à la fissuration est peu traitée ([Rosendahl et al. 2019](#)).

De par la capacité amortissante des polymères comparativement aux métaux, de leur caractère viscoélastique et de leur faible conductivité, un chargement à hautes fréquences ou taux de déformation engendrera un échauffement qui modifiera localement la température du polymère diminuant sa rigidité, donc la cohésion du matériau ([Constable et al. 1970](#)). Il est alors indispensable de dimensionner la couche de mastic pour contrebalancer cette fatigue thermique propre aux polymères par l'addition de particules de forte conductivité thermique tel que le noir de carbone ([Hamed et al 2003](#)). De plus certains mastics cristallisent sous grande déformation ([Gent et al 1990](#)). Contrairement à l'effet Mullins, cette rigidité supplémentaire due à la cristallisation ne diminue pas sous chargement cyclique. Dans cet état semi-cristallin, ces mastics résistent mieux à la fissuration, et donc montrent de meilleures propriétés en fatigue. Jouer sur ce changement morphologique du mastic est aussi la garantie d'une meilleure tenacité à l'arrachement.

## OBJECTIFS DE LA THÈSE

Il apparaît alors que la formulation d'un mastic fonctionnalisé implique en premier lieu d'être capable de comprendre, de caractériser puis de modéliser le comportement mécanique de matériaux élastomériques à comportement fortement non linéaires en temps, température et déformation, sous des sollicitations cycliques.

**Le premier objectif** de ce projet est alors de développer une méthodologie de caractérisation et de modélisation numérique et expérimentale du comportement mécanique en fatigue fluage des matériaux élastomères utilisés en couche adhésive et des assemblages HBC utilisant ces matériaux. Les essais numériques permettent de réduire le coût des essais expérimentaux et de mieux comprendre le comportement mécanique. Cependant, ils doivent reposer sur des principes de modélisation adaptés aux comportements mécaniques observés lors des essais expérimentaux. De plus, chercher à réduire les temps de calcul reste toujours un enjeu en phase de prédimensionnement en bureau d'étude ou dans le cadre d'algorithmes d'optimisation ou de calculs statistiques, bien que les capacités de calcul soient de plus en plus importantes. Un **enjeu** du projet est donc de déterminer le niveau nécessaire de complexité de modélisation et de technique de résolution associée en fonction du comportement mécanique à simuler. Ainsi, différentes méthodes de simulation seront développées et évaluées, des simulations basées sur des modélisations 1D associées à une résolution analytique à celles basées sur des modélisations 3D associées à la résolution par éléments finis. En particulier, une attention particulière sera portée à la simulation de niveau de complexité intermédiaire, basée sur une modélisation de la couche adhésive par une fondation élastique ou zone cohésive résolue par la technique par macro-élément, développée à l'ICA depuis 2004 pour les assemblages boulonnés et/ou collés. Ce niveau de simulation intermédiaire est aujourd'hui utilisé dans le cadre de la thèse, en cours, de Thiago Birro (ICA, CIRIMAT) afin de caractériser le comportement mécanique de l'interface entre le substrat et le matériau adhésif, mesuré sur des essais de flexion trois points. L'idée est ici est de définir le champ d'application de cette méthode de simulation intermédiaire, initialement adaptée aux colles, aux matériaux élastomériques utilisés en couche adhésive, ainsi que de l'y étendre si pertinent. Les résultats des simulations numériques seront confrontés entre eux ainsi qu'aux résultats des essais expérimentaux. Une instrumentation, incluant en particulier stéréo-corrélation et thermographie IR, sera utilisée dans un protocole expérimental à établir en fonction des résultats des essais expérimentaux élémentaires.

Le **second objectif** est de proposer une formulation de mastic fonctionnalisé en cohésion et adhésion permettant d'améliorer significativement la tenue en fatigue des assemblages boulonnés aéronautiques. Le premier challenge est de limiter au maximum l'échauffement du mastic sous fatigue par ajout de charges conductrices thermiques et/ou de quenchers capables de désactiver un état excité créé, lors d'un chargement thermique, dans une entité moléculaire par transfert d'énergie, d'électron ou par un mécanisme chimique thermique. L'enjeu est clairement d'optimiser la tenue en fatigue fluage du mastic en tant que structure. Le second challenge est de conserver la raideur du mastic dans le temps ainsi que sa tenue au pelage en travaillant sur le choix des charges conductrices, leurs facteurs de forme, leur quantité, leur comportement au frottement dans le mastic et bien évidemment sur leur mélangeage dans la matrice polymère. Le troisième challenge est de conserver le niveau d'adhérence initiale sur le mastic de référence. Pour atteindre cet objectif, une attention particulière sera portée sur l'étude de l'adhérence et des faciès de rupture après les tests d'adhérence, pour lier la formulation aux potentielles réactions à l'interface et enfin à l'adhérence. L'amélioration sera considérée comme significative si le nombre de fixations mécaniques peut être réduit d'un tiers.

## PROGRAMME DE LA THÈSE

Le projet comporte trois volets complémentaires et imbriqués menés par chacune des 3 équipes (Figure 2) :

- volet 1 mené par l'ICA : comportement structural
- volet 2 mené par le CIRIMAT : comportement mécanique et chimique de l'interface
- volet 3 mené par le LGP : comportement physico-chimique du mastic de base et des formulations

Les travaux de MIAM seront menés dans un schéma itératif à partir d'un mastic d'étanchéité de référence qui sera progressivement fonctionnalisé. Les comportements structure, interface et matériau seront étudiés sur la base à l'aide de travaux précédents (Hoang-Ngoc et Paroissien 2010) afin de constituer l'état de l'art. Une campagne d'essais expérimentaux et numériques structure, interface et matériau sera alors menée afin de caractériser, modéliser et comprendre les réponses mécaniques avec le mastic de référence. Enfin, sur la base de la compréhension des résultats expérimentaux précédents, la démarche de fonctionnalisation du mastic de référence sera entreprise et testée expérimentalement et numériquement afin de converger vers un prototype de mastic fonctionnalisé caractérisé adossé à une méthodologie de caractérisation et modélisation dédiée.

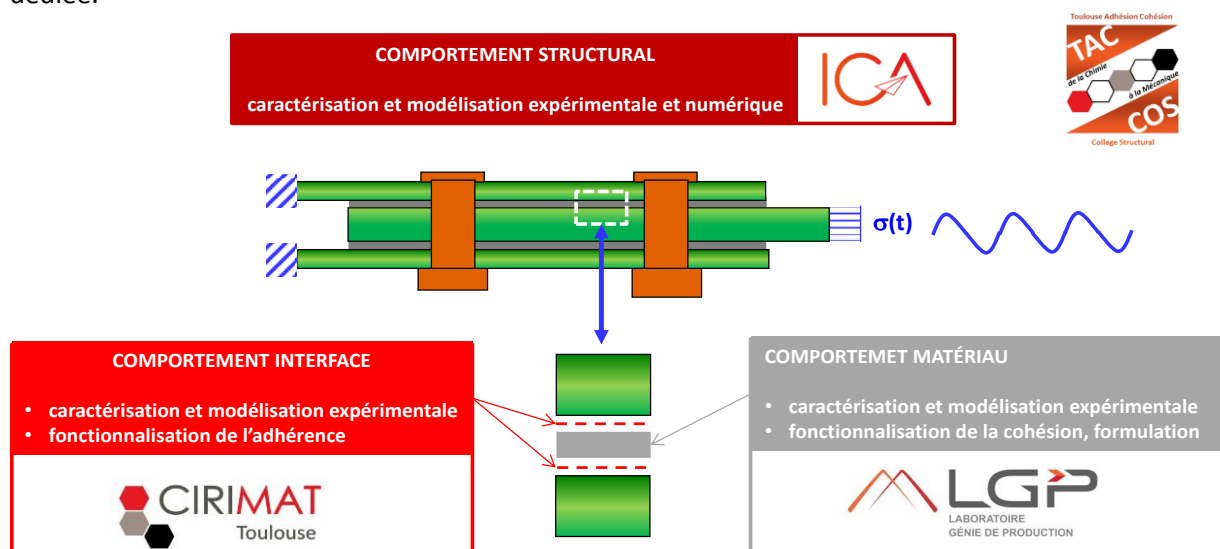


Figure 2 – Organisation des travaux et complémentarité des équipes

(Adams and Mallick 1993) Adams, R.D., and Mallick, V., "The effect of temperature on the strength of adhesively-bonded composite-aluminium joints," *The Journal of Adhesion*, Vol. 43, pp. 17-33. doi: 10.1080/00218469308026585

(Austrell 1997) Austrell, P.E., 1997. Modeling of elasticity and damping for filled elastomers. Report TVSM-1009, Lund University, SW.

(Bradley et al. 2019) Bradley, J., and Tothil, G., 2019. Sealing and shimming of structural joints. US Patent, 2019/0003504A1

(Bodjona et al. 2015) Bodjona, K., Raju, K., Lim, G.H., and Lessard, L., 2015. Load sharing in single-lap bonded/bolted composite joints. Part I: Model development and validation. *Composite Structures*, Vol. 129, 2015, pp. 268-275. doi : 10.1016/j.compstruct.2015.04.040

(Choi et al. 2017) Choi, J.I., Hasheminia, S.M., Chun, H.J., and Park, J.C., 2017. Experimental study on failure mechanism of hybrid composite joints with different adhesives. *Fibers and Polymers*, Vol. 18, pp. 569-574. doi : 10.1007/s12221-017-1148-z

(Constable et al 1970) Fatigue and cyclic thermal softening of thermoplastics, I. Constable\*, J. G. Williamst and D. J. Burnst, *Journal of Mechanical engineering science*, Vol 12 No 1 1970

(Gent et al 1998) A. N. Gent, S. Kawahara, and J. Zhao (1998) Crystallization and Strength of Natural Rubber and Synthetic cis-1,4-Polyisoprene. *Rubber Chemistry and Technology*: September 1998, Vol. 71, No. 4, pp. 668-678.

(Hamed et al 2003) G. R. Hamed and A. A. Al-Sheneper (2003) Effect of Carbon Black Concentration on Cut Growth in NR Vulcanizates. *Rubber Chemistry and Technology*: May 2003, Vol. 76, No. 2, pp. 436-460.

(Hartman 1966) Hartman, A., 1966. Fatigue tests on single-lap joints in clad 2024-T3 aluminium alloy manufactured by a combination of riveting and adhesive bonding. NLR TN M2170, 1966, Amsterdam, The Netherlands.

(Hart-Smith 1985) Hart-Smith, L.J., 1985. Bonded-bolted composite joints. *Journal of Aircraft*, Vol. 22, No. 11, pp. 993-1000. doi: 10.2514/3.45237

(Higgins 2000) Higgins, A., 2000. Adhesive bonding of aircraft structures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 20, pp. 367-376. doi: 10.1016/S0143-7496(00)00006-3

(Hoang-Ngoc et Paroissien 2010) Hoang-Ngoc, C.T., and Paroissien, E., 2010. Simulation of Single-Lap Bonded and Hybrid (Bolted/Bonded) Joints with Flexible Adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 30, No. 3, pp.117-129. doi : 10.1016/j.ijadhadh.2009.12.002

(Kelly 2006) Kelly, G., 2006. Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints. *Composite Structures*, Vol. 72, 2006, pp. 119-129. doi: 10.1016/j.compstruct.2004.11.002

(Kweon et al. 2006) Kweon, J.K., Jung, J.W., Kim, T.H., Choi, J.H., and Kim, D.H., 2006. Failure of carbon composite-to-aluminium joints with combined fastening and adhesive bonding. *Composite Structures*, Vol. 75, pp. 192-198. doi: 10.1016/j.compstruct.2006.04.013

(Lim et al. 2018) Lim, G.H., Bodjona, K., Raju, K., Romanov, V., Fielding, S. and Lessard, L., 2018. Evolution of mechanical properties of flexible epoxy adhesives under cyclic loading and its effects on composite hybrid bolted/bonded joint design. *Composite Structures*, Vol. 189, pp. 54-60. doi : 10.1016/j.compstruct.2018.01.049

(Marques et al. 2019) Marques, JB, Barbosa, AQ, da Silva, CI, Carbas, RJC, da Silva, LFM, 2019. An overview of manufacturing functionally graded adhesives – Challenges and prospects. *The Journal of Adhesion*. doi: 10.1080/00218464.2019.1646647

(Paroissien 2006) 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/>

(Paroissien et al. 2017) Paroissien, E., Lachaud, F., Schwartz, S., Da Veiga, A., and Barrière, P., 2017. Simplified stress analysis of hybrid (bolted/bonded) joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 77, pp. 183-197. doi : 10.1016/j.ijadhadh.2017.05.003

(Rosendahl et al. 2019) Rosendahl, P. L., Staudt, Y., Odenbreit, C., Schneider, J., and Becker, W., 2019. Measuring mode I fracture properties of thick-layered structural silicone sealants. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 91, 64-71.

(Saad 2003) Saad, P., 2003. Modélisation et identification du comportement non linéaire des cales en caoutchouc. PhD Dissertation, Ecole Centrale de Lyon, FR.

## PROFIL

Ingénieur ou master 2 en mécanique des matériaux, structures ou procédés avec un goût pour la simulation numérique, les essais mécaniques et la physico-chimie.

## CONTACT

Envoyer une candidature motivée (CV+LM) à Valérie Nassiet et Éric Paroissien par e-mail : [valerie.nassiet@enit.fr](mailto:valerie.nassiet@enit.fr) et [eric.paroissien@isae-supaero.fr](mailto:eric.paroissien@isae-supaero.fr).

## LABORATOIRE D'ACCUEIL

Le laboratoire d'accueil est l'Institut Clément Ader (ICA), à Toulouse, CNRS UMR 5312.

## DURÉE ET RÉMUNÉRATION

36 mois à partir de l'automne 2020.

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