

PROGRAMME &  
RECUEIL DES RÉSUMÉS

4<sup>e</sup> Colloque **LES**  
**ASSEMBLAGES**  
**MÉCANIQUES**

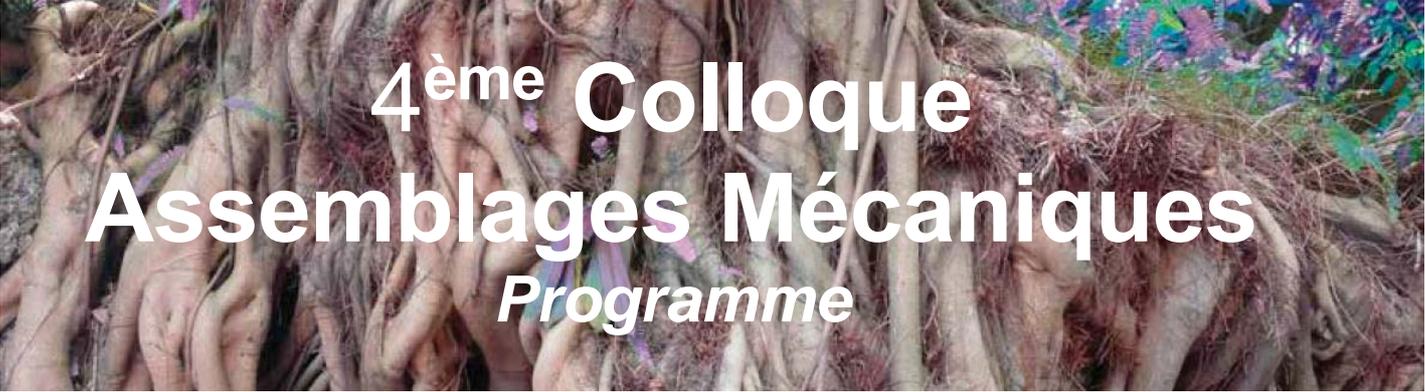
*Évolutions récentes et perspectives*



**SAINT-OUEN**  
**1-2 JUILLET 2021**







# 4<sup>ème</sup> Colloque Assemblages Mécaniques Programme

Jeudi 1<sup>er</sup> Juillet

8h30 – 9h00 Accueil des participants  
9h15 Mot de bienvenue - Directeur Général ISAE-Supméca [Philippe GIRARD](#)

## Conférences d'ouverture

9h30 – 10h00 L'assemblage mécanique à Airbus Helicopters : activités et perspectives  
[Victor ACHARD](#), [Emilie ORENGO](#), [Delphine CORDIER](#), [Jérôme PANTER](#)  
Airbus Helicopters, Marignane

10h00-10h30 Challenge AI for Industry 2020 : retour d'expérience et opportunités pour les assemblages mécaniques  
[Martin GHIENNE](#) <sup>(1)</sup>, [Ludovic PLATON](#) <sup>(2)</sup>, [Tristan BARBAGELATA](#) <sup>(2)</sup>, [Pierre ESCAMILLA](#) <sup>(2)</sup>, [Sana MZALI](#) <sup>(2)</sup>, [Meng LIAO](#) <sup>(2)</sup>, [Sylvain LASSONDE](#) <sup>(2)</sup>, [Antonin BRAUN](#) <sup>(2)</sup>  
(1) : ISAE - Supméca, Laboratoire QUARTZ EA 7393, Saint Ouen sur Seine  
(2) : Aquila Data Enabler - Aquila Le Lab, Courbevoie

10h30 - 11h00 Café Poster / exposition

## Session 1 - Dynamique des assemblages

11h00 – 11h30 Connecteur élément fini non-linéaire avec frottement et plasticité pour la simulation des assemblages boulonnés  
[Pierre-Alain GUIDAULT](#), [Richard VERWAERDE](#), [Pierre-Alain BOUCARD](#)  
ENS Paris-Saclay, LMT, Saclay

11h30 – 12h00 Vers un modèle simplifié d'usure des douilles du mécanisme de calage variable d'aubes  
[Myriam HARNAFI](#) <sup>(1)</sup>, [Pierre-Alain BOUCARD](#) <sup>(1)</sup>, [Pierre-Alain GUIDAULT](#) <sup>(1)</sup>,  
[Christian PALECZNY](#) <sup>(2)</sup>  
(1) ENS Paris-Saclay, LMT, Saclay  
(2) Safran (SAE), Villaroche

12h00-12h30 Comportement dynamique non-linéaire de structures bois assemblées par broches et ferrures  
[Thomas CATTEROU](#)  
Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement, Bordeaux

---

12h30 – 13h30 Déjeuner / exposition

13h30 – 14h00 Initiation projets Collaboratifs

## Session 2 - Assemblages par collage ou soudage

14h00 – 14h30 Effect of sandblasting on composite surface quality and bonded joints shear strength

Amal BECHIKH <sup>(1)</sup>, Olga KLINKOVA <sup>(1)</sup>, Imad TAWFIQ <sup>(1)</sup>, Yamen MAALEJ <sup>(2)</sup>, Rachid NASRI <sup>(2)</sup>

(1) ISAE - Supméca, Laboratoire QUARTZ EA 7393, Saint Ouen sur Seine

(2) ENIT, LR-MAI, Tunis

14h30 – 15h00 Effet du cycle de polymérisation sur la création de pores dans les joints adhésifs structuraux de type époxy

Claudiu BADULESCU <sup>(1)</sup>, Malick DIAKHATE <sup>(2)</sup>, Vincent DUMONT <sup>(3)</sup>, Jérôme ADRIEN <sup>(4)</sup>, Marina BUNEA <sup>(1)</sup>, David THEVENET <sup>(1)</sup>

(1) ENSTA Bretagne, IRDL, Brest

(2) IUT Brest, Morlaix

(3) SAFRAN Resoc Saint Pierre du Perray

(4) INSA Lyon, MATEIS CNRS UMR5510, Villeurbanne

15h00-15h30 Interface models for micro-cracking damage in adhesives

Maria Letizia RAFFA

ISAE - Supméca, Laboratoire QUARTZ EA 7393, Saint Ouen sur Seine

15h30 - 16h00 Assemblage alliage d'aluminium/acier par Cold Spray

Amela KUSURAN <sup>(1)</sup>, Ludovic VITU <sup>(1)</sup>, Geoffrey DARUT <sup>(1)</sup>, Marie-Pierre PLANCHE <sup>(1)</sup>, David MERCS <sup>(2)</sup>

(1) UTBM, Belfort

(2) IRTES-LERMPS, Sevenans

16h00 – 16h30 Café Poster/ exposition

## Session 3 - Fretting-Fatigue

16h30 – 17h00 Fretting fatigue dans un câble d'ancrage offshore: couplage numérique-expérimental pour prédiction de la durée de vie

Sébastien MONTALVO <sup>(1)</sup>, Siegfried FOUVRY <sup>(1)</sup>, Michaël MARTINEZ <sup>(2)</sup>

(1) : ECL, LTDS, Lyon

(2) : IFP Energies, Rueil

17h00 – 17h30 Caractérisation et modélisation multi-échelle du comportement en fretting-fatigue des conducteurs pour le transport d'énergie

Julien SAID <sup>(1)</sup>, Siegfried FOUVRY <sup>(2)</sup>, Christine YANG <sup>(1)</sup>, Fikri HAFID <sup>(1)</sup>, Jérôme BROCARD <sup>(1)</sup>, Marc COULANGEON <sup>(1)</sup>

(1) : RTE, Lyon

(2) : ECL, LTDS, Lyon

17h30 – 18h00 L'évaluation de l'endurance d'un conducteur en hybridant simulation numérique et modélisation statistique

Abderrahim BELKHABBAZ

Eurobios, Cachan

18h00 – 18h30 Modélisation de la fatigue d'assemblages métalliques par une approche locale

Maxime NUTTE <sup>(1)</sup>, Serge KRUCH <sup>(1)</sup>, Bertrand LANGRAND <sup>(2)</sup>, Pascale KANOUTE <sup>(1)</sup>

(1) : ONERA, Chatillon

(2) : ONERA, Lille

19h00 – 22h00 Dîner & Animations

---

# Vendredi 2 Juillet

8h30 – 9h00 Accueil des participants

## Conférence d'ouverture (2<sup>ème</sup> jour)

9h00 – 9h40 **Les incontournables d'une montée en compétence réussie**  
**Comment assurer la qualité et la sécurité des assemblages ?**  
Luc MOYART <sup>(1)</sup>, Jérôme MERCIER <sup>(2)</sup>  
(1) : ALSTOM Transport, Saint Ouen sur Seine  
(2) : SNCF, Paris

9h40 – 10h30 **Ateliers initiation projets Collaboratifs**

10h30 - 11h00 **Café Poster/ exposition**

## Session 4 - Problématique du serrage

11h00 – 11h30 **Mise au point d'un outil d'assistance par réalité augmentée au serrage de brides boulonnées avec joint d'étanchéité.**  
Florent LEDRAPPIER, Loick ALLEGRE, Vincent PERROT, Yann KERKHOF, Yann REYMOND, Maxime LORIMIER  
TECHNETICS Group France, Laboratoire d'Etanchéité Pierrelatte

11h30 – 12h00 **Serrage – Travaux en cours et nouvelle approche pour l'exploitation des données de caractérisation**  
Zouhair CHAIB <sup>(1)</sup>, Christophe DELCHER <sup>(1)</sup>, Karim DEMMOU <sup>(2)</sup>  
(1) : Centre Technique des Industries Mécaniques, Senlis  
(2) : Safran Aircraft Engines, Villaroche

12h00 – 13h30 **Tenue au glissement et au dévissage – Travaux en cours et Solution d'adhérence innovante**  
Christophe DELCHER <sup>(1)</sup>, Pierrick PAVALLIER <sup>(2)</sup>, Stéphane ROLL <sup>(3)</sup>  
(1) : CETIM, Senlis  
(2) : HEF, Durferrit  
(3) : ALSTOM Saint Ouen sur Seine

12h30 – 14h00 **Déjeuner/ exposition**

---

## Session 5 - Comportement sous environnement

**14h00 – 14h30** Comportement mécanique de réducteurs thermiques par platines boulonnées

Maël COUCHAUX <sup>(1)</sup>, Amor BEN LARBI <sup>(2)</sup>

(1) : INSA, Rennes

(2) : CTICM, Saint Aubin

**14h30 – 15h00** Caractérisation et comportement à chaud des fixations en acier inoxydable

Julien MOINE, Christophe DELCHER, Jean-Paul AMARO, Laurent GIBOUREAU

CETIM, Senlis

**15h00 – 15h30** Thermal ageing of electronic component solder joints for space applications

Vincent VOET <sup>(1)</sup>, Frederik Van LOOCK <sup>(1)</sup>, Christophe DE FRUYTIER <sup>(1)</sup>, Aude SIMAR <sup>(1)</sup>,  
Thomas PARDOEN <sup>(2)</sup>

(1) : Université Catholique de Louvain, Louvain

(2) : IMMC Université Catholique de Louvain, Louvain

**15h30 – 16h00** Fragilisation par l'H d'assemblages mécaniques - Un problème souvent mal compris

Alexandre FLEURENTIN

Metallo Corner, Paris, France

**16h00 – 16h30** Café Poster/ exposition

**16h30 – 17h30** Restitution & Plan d'actions initiation projets collaboratifs

**17h30** Clôture du Colloque Assemblages 2021

---

# Posters

Vis intelligente pour assemblages connectés

Jean-Philippe GODIN, Hugo FOURCADE

Texis Group

Bonding polymer composites with PEI film: crack trapping and enhanced fracture resistance

Charline VAN INNIS, Wael BALLOUT, Christian BAILLY, Thomas PARDOEN

(1) : Institute of Mechanics, Materials and Civil Engineering, Louvain

(2) : Institut de la matière condensée et des nanosciences, Louvain

Fretting fatigue of shrink fitted assembly under rotating bending loading: a numerical and experimental study to compare Crossland fatigue stress analysis and Ruiz contact stress approach.

Benjamin DIEU (1), Siegfried FOUVRY (1), Florent BRIDIER (2), Christian MENARD (2)

(1) : ECL, LTDS, Lyon

(2) : NAVAL Group

Optimisation de la conception des assemblages soudés par les réseaux de neurones

Romdhane BEN KHALIF

École nationale supérieure d'ingénieurs de Tunis

Simulation numérique d'un procédé de sertissage à ski

Oussama FILALI <sup>(1)</sup>, Sandrine THUILLIER <sup>(1)</sup>, Sébastien BECH <sup>(2)</sup>, Philippe BEYET <sup>(3)</sup>

(1) : Université de Bretagne Sud, IRDL UMR CNRS 6027, Lorient

(2) : Stellantis, Centre technique Velizy

(3) : Stellantis, Pôle Excelcar

# Table des résumés

Programme	1
L'assemblage mécanique à Airbus Helicopters : activités et perspectives, Achard Victor [et al.]	8
Challenge AI for Industry 2020 : retour d'expérience et opportunités pour les assemblages mécaniques, Ghienne Martin [et al.]	10
Connecteur élément fini non-linéaire avec frottement et plasticité pour la simulation des assemblages boulonnés, Guidault Pierre-Alain [et al.]	12
Vers un modèle simplifié d'usure des douilles du mécanisme de calage variable d'aubes, Harnafi Myriam [et al.]	14
Comportement dynamique non-linéaire de structures bois assemblées par broches et ferrures, Catterou Thomas	16
Effect of sandblasting on composite surface quality and bonded joints shear strength, Bechikh Amal [et al.]	18
Effet du cycle de polymérisation sur la création de pores dans les joints adhésifs structuraux de type époxy, Badulescu Claudiu [et al.]	20
Interface models for micro-cracking damage in adhesives, Raffa Maria Letizia	22
Assemblage alliage d'aluminium/acier par Cold Spray, Kusuran Amela [et al.]	24
Fretting fatigue dans un câble d'ancrage offshore: couplage numérique-expérimental pour prédiction de la durée de vie, Montalvo Sébastien [et al.]	26
Caractérisation et modélisation multi-échelle du comportement en fretting-fatigue des conducteurs pour le transport d'énergie, Said Julien [et al.]	28

Modélisation de la fatigue d'assemblages métalliques par une approche locale, Nutte Maxime [et al.]	32
Les incontournables d'une montée en compétence réussie, Moyart Luc [et al.]	34
Mise au point d'un outil d'assistance au serrage de brides boulonnées avec joint d'étanchéité par réalité augmentée , Ledrappier Florent [et al.]	36
Serrage – Travaux en cours et nouvelle approche pour l'exploitation des données de caractérisation, Chaib Zouhair [et al.]	38
Tenue au glissement et au dévissage – Travaux en cours et Solution d'adhérence innovante, Delcher Christophe [et al.]	40
Comportement mécanique de réducteurs thermiques par platines boulonnées, Couchaux Mael [et al.]	42
Caractérisation et comportement à chaud des fixations en acier inoxydable, Moine Julien [et al.]	44
Thermal ageing of electronic component solder joints for space applications, Voet Vincent [et al.]	46
Fragilisation par l'H d'assemblages mécaniques - Un problème souvent mal compris, Florentin Alex	48
Vis intelligentes pour assemblages connectés, Godin Jean-Philippe [et al.]	50
Bonding polymer composites with PEI film: crack trapping and enhanced fracture resistance, Van Innis Charline [et al.]	52
Fretting fatigue of shrink fitted assembly under rotating bending loading: a numerical and experimental study to compare Crossland fatigue stress analysis and Ruiz contact stress approach., Dieu Benjamin [et al.]	54
Optimisation de la conception des assemblages soudés par les réseaux de neurones, Ben Khalifa Romdhane	56
Simulation numérique d'un procédé de sertissage à ski, Filali Oussama [et al.]	58

## L'assemblage mécanique à Airbus Helicopters : activités et perspectives

V. Achard<sup>1</sup>, E. Orenge<sup>1</sup>, D. Cordier<sup>1</sup>, et J. Panter<sup>1</sup>

1. Airbus Helicopters, Aéroport International Marseille Provence, 13700 Marignane

**MOTS CLES :** aéronautique, hélicoptères, fixations, procédés.

### INTRODUCTION

En tant qu'architecte majeur de la production d'hélicoptères, Airbus Helicopters accorde une place centrale aux composants et procédés d'assemblage mécaniques. La maîtrise industrielle de ces technologies, combinée au déploiement de solutions d'assemblages innovantes adaptées à ses exigences spécifiques, contribuent largement à sa compétitivité au sein du secteur aéronautique.

La diversité des contraintes de conception et de fabrication des sous-ensembles caractéristiques d'un hélicoptère conduit à la mise en œuvre d'une multiplicité de configurations d'assemblage (cellule, voilure tournante, groupe motopropulseur, commandes de vol, etc.). Au sein du laboratoire des matériaux et procédés, ceux-ci sont étudiés, testés, définis et optimisés en partenariat avec les différents acteurs de l'ingénierie, de la production, du support en service et des entités commerciales de la société.

### COMPOSANTS D'ASSEMBLAGES

Les niveaux de sollicitations statiques, dynamiques ou thermiques inhérents au fonctionnement de l'hélicoptère imposent l'utilisation de composants d'assemblage de haute performance. L'enjeu est de garantir un haut niveau de sécurité pour des masses minimales.

Dans ce contexte, les éléments filetés recensent un grand nombre de matériaux et de procédés nécessaires à leur élaboration. Ainsi, les opérations de traitements thermiques, usinages, travail à froid, forgeage ainsi que les protections de surface impactent directement leurs performances. Ils requièrent un contrôle exigeant. Les axes critiques, dont les méthodes de fabrication sont dites « gelées », condensent les critères les plus restrictifs et reflètent le niveau de qualité exigible au sein des ensembles dynamiques (transmissions et rotors).

Par ailleurs, la continuité structurelle et électrique du fuselage est majoritairement obtenue par rivetage. Divers procédés sont déployés en accord avec la nature de l'assemblage considéré, de la performance mécanique attendue, de l'accessibilité et de la maintenance opérationnelle. Les méthodes de perçage et les produits mis en œuvre sont en constante amélioration avec le développement de nouveaux programmes. L'emploi de boulons aveugles performants et de systèmes sertis ont notamment permis de réduire les temps de cycles avec un niveau de qualité élevé sur les structures composites.

Dans le cadre des programmes récents (H175-H160), une attention spécifique a été portée à l'introduction de composants répondant aux exigences environnementales européennes (REACH). De plus, l'évolution des directives de l'Agence Européenne de la Sécurité Aérienne ont impacté les exigences en termes de fiabilité et de validation technique des composants, particulièrement autour des méthodes de protection contre la fragilisation par l'hydrogène.



Figure 1: Ensemble dynamique Airbus Helicopters.

### PROCEDES D'ASSEMBLAGES

Conjointement aux composants, les procédés associés à l'installation et au contrôle conditionnent la performance technico-économique des assemblages. A ce titre, les défis sont nombreux pour Airbus Helicopters, spécifiquement autour des axes de travail suivants :

- Amélioration de la qualité opérationnelle du procédé de serrage au couple via le déploiement de nouveaux outillages numériques intégrés et la modernisation des méthodes de contrôles.
- Sécurisation des assemblages boulonnés en milieu vibratoire.
- Recherche de solutions innovantes réduisant les coûts récurrents associés au rivetage et à l'installation de pièces frettées ou expansées.
- Exploitation des outils numériques de simulation pour la caractérisation et le contrôle avancé de nos procédés.



## Challenge AI for Industry 2020 : retour d'expérience et opportunités pour les assemblages mécaniques

Martin Ghienne<sup>1</sup>, Ludovic Platon<sup>2</sup>, Tristan Barbagelata<sup>2</sup>, Pierre Escamilla<sup>2</sup>, Sana Mzali<sup>2</sup>, Meng Liao<sup>2</sup>, Sylvain Lassonde<sup>2</sup>, Antonin Braun<sup>2</sup>

1. Laboratoire Quartz EA7393, ISAE-Supméca, Institut supérieur de mécanique de Paris, 3, rue Fernand Hainaut, 93407 Saint-Ouen Cedex, France

2. Aquila Data Enabler, 47 rue Louis Blanc, Immeuble 5ème Avenue, 92400 Courbevoie, France

**MOTS CLES :** Machine Learning, Challenge IA for Industry 2020, assemblages mécaniques

### INTRODUCTION

Les progrès réalisés en calcul haute performance et « cloud-computing », l'accès aux données massives et le développement de bibliothèques open-sources dédiées au « Big data » et au « Deep Learning » ont permis à l'Intelligence Artificielle (IA) et aux techniques de Machine Learning (ML) de faire face à de nombreux défis dans des domaines aussi variés que la santé, la finance, le traitement d'image, le traitement du langage, le transport ou encore l'industrie en général. Dans le cadre du plan IA2021, la région Île-de-France et Dassault Aviation ont organisé le challenge « AI Challenge for Industry 2020 » dont l'objectif est de développer des capteurs virtuels basés sur des techniques d'apprentissage et permettant d'estimer l'état de contrainte de différentes parties structurelle d'un avion d'affaires de type Falcon à partir des seuls instruments de bord de l'avion. Les assemblages mécaniques sont quasiment indispensables à la réalisation de produits industriels et de nombreux défis restent à relever que ce soit pour la conception et l'optimisation des assemblages, leur simulation, la maîtrise des procédés de mise en œuvre ou le suivi de leur comportement en service. De nombreuses données sont disponibles (campagnes de tests de validation ou de certification par exemple) et peuvent être valorisées à l'aide de techniques d'apprentissage.

Ce travail propose de présenter une démarche de résolution classique d'un problème de « data science » et son application pour répondre au challenge « AI for Industry 2020 ». L'objectif de cette présentation est ainsi de faire émerger de nouvelles pistes de travail et de collaboration pour lesquelles les techniques d'IA apporteront de nouvelles opportunités pour répondre aux problématiques liées aux assemblages mécaniques.

### SYNOPTIQUE DU CHALLENGE AI FOR INDUSTRY 2020

Dassault Aviation dispose d'une base de données importante de vols d'essai établis pour le développement et la validation de leurs jets d'affaires Falcon. En plus de l'instrumentation de bord des avions conventionnels, les avions d'essai sont équipés de nombreux capteurs additionnels (capteurs de température, sondes de pression, tubes de Pitot, potentiomètres ou jauges d'extensométrie). Dans le cadre du challenge, les signaux de 130 instruments de bord et de 67 jauges d'extensométrie ont été enregistrés au cours de près de 300 vols d'essais afin de constituer une base de données significative du comportement de ces aéronefs en vol. Cette base de données a été utilisée afin d'entraîner un modèle de ML capable de prédire l'état de contrainte mécanique de la structure de l'avion en phase de service. Ce modèle constitue alors un capteur virtuel de contrainte mécanique pouvant être utilisé par la suite pour alimenter un jumeau numérique de l'avion et mettre en place une stratégie de maintenance prédictive pour les avions commerciaux de la gamme Falcon.

### AUTRE SECTEURS D'APPLICATION : RETOURS D'EXPÉRIENCE DES PARTENAIRES

Dans d'autres contextes industriels, les techniques d'apprentissage ont pu être utilisées par le consortium pour répondre aux problèmes suivants :

- définition d'un système embarqué intelligent et non-intrusif pour le suivi de production (Projet Keyprod) ;
- détection automatique d'obstructions pour le développement d'une pompe intelligente (KSB) ;
- localisation de défauts par traitement d'image, mesure ultrason ou mesure laser (Ariane Group) ;
- analyse de performance d'unité de production industrielle (Total, Chantier de l'Atlantique).



# Connecteur élément fini non-linéaire avec frottement et plasticité pour la simulation des assemblages boulonnés

P.-A. Guidault<sup>1</sup>, R. Verwaerde<sup>1</sup>, P.-A. Boucard<sup>1</sup>

1. Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMT - Laboratoire de Mécanique et Technologie, 4 avenue des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette

**MOTS CLES :** Liaison boulonnée, connecteur élément fini, frottement, plasticité, Abaqus<sup>TM</sup>

## INTRODUCTION

Le dimensionnement et l'optimisation des assemblages boulonnés à l'aide d'un modèle éléments finis volumiques boulon par boulon sont généralement coûteux en termes de mise au point et de temps de calcul. Un modèle simplifié de liaison boulonnée basé sur des paramètres de conception (précharge, coefficient de frottement, matériau...) est ici proposé et dont l'identification, l'utilisation et l'exploitation se font de manière aisée dans les codes de calcul couramment utilisés en bureaux d'études. Ce modèle ne cherche pas à représenter de façon fine la solution au voisinage du boulon mais à prédire de façon satisfaisante des quantités d'intérêt globales comme la rigidité, le décollement/glisement des pièces assemblées, la plastification du boulon...

## DESCRIPTION DU MODELE

Le modèle simplifié, de type connecteur, se substitue au boulon (Fig. 1) et encapsule les phénomènes de frottement localisés au voisinage du boulon, permettant ainsi d'utiliser des interfaces de contact sans frottement ailleurs.

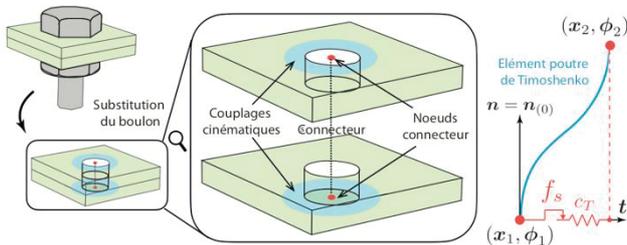


Figure 1 : Modèle simplifié de connecteur

Sa cinématique est celle d'une poutre de Timoshenko à comportement élasto-plastique, représentant le boulon, en parallèle d'un mécanisme de frottement affectant uniquement le comportement tangentiel du connecteur. Le comportement normal, dans l'axe du connecteur, prend en compte la raideur de la vis et permet d'installer automatiquement la précharge. L'identification du comportement se fait à

partir d'un modèle volumique de liaison générique à un boulon représentatif de la liaison étudiée.

## APPLICATION NUMERIQUE

Implanté dans Abaqus<sup>TM</sup> sous forme d'un élément utilisateur, le modèle proposé permet de représenter de façon satisfaisante les glissements au niveau de chaque boulon par rapport au modèle de référence tout volumique (Fig. 2).

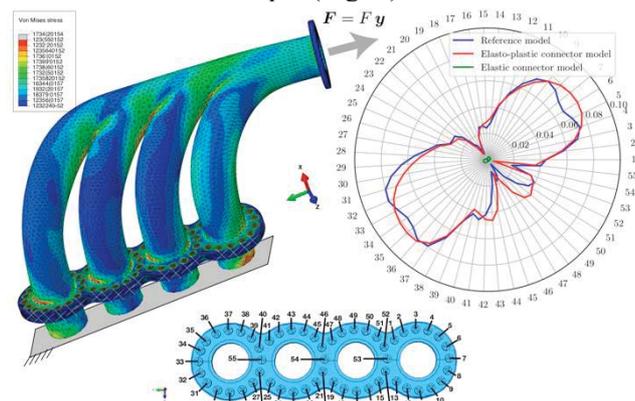


Figure 2 : Glissement au niveau de chaque boulon

## CONCLUSION

Le modèle simplifié conduit à une réduction importante du temps de calcul. Par sa simplicité de mise en œuvre, il permet également un gain de temps significatif dans la mise en données du problème.

## Références

- [1] R. Verwaerde, P.-A. Guidault, P.-A. Boucard (2020) « *A nonlinear finite element connector for the simulation of bolted assemblies* », Computational Mechanics, **65**, pp. 1531-1548.
- [2] R. Verwaerde, P.-A. Guidault, P.-A. Boucard (2021) « *A non-linear finite element connector model with friction and plasticity for the simulation of bolted assemblies* », Finite Elements in Analysis and Design, (soumis).



## Vers un modèle simplifié d'usure des douilles du mécanisme de calage variable d'aubes

M. Harnafi<sup>1,2</sup>, P.-A. Boucard<sup>1</sup>, P.-A. Guidault<sup>1</sup>, C. Paleczny<sup>2</sup>

1. Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMT - Laboratoire de Mécanique et Technologie, 4 avenue des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette
2. Safran Aircraft Engines, site de Villaroche, Rond-point René Ravaud, 77550, Moissy-Cramayel, France

**MOTS CLES :** Méthodes numériques, Usure, Paliers lisses, Variable Stator Vanes

### INTRODUCTION

La prédiction de l'usure des composants des turbomachines est un enjeu majeur pour les constructeurs aéronautiques dans une optique d'extension de leur durée de vie. Ce travail s'intéresse aux paliers lisses, ou douilles, situés au cœur du système de calage variable des aubes de redresseur (*Variable Stator Vane* (VSV)). Ces pièces d'usure fortement sollicitées thermo-mécaniquement assurent un guidage en rotation de l'axe des aubes, ce qui permet d'ajuster en continu l'incidence du flux d'air. Une usure excessive peut entraîner des coûts de maintenance élevés, des baisses de performances du moteur et, dans les cas extrêmes, des risques de pompage du compresseur.



Figure 1 : Profil d'usure des douilles VSV

Différentes approches numériques de prédiction de l'usure ont été développées antérieurement : un modèle analytique 2D générique capable d'estimer des usures sous des sollicitations cycliques, et des modèles éléments finis 3D [1] permettant d'obtenir les niveaux de pression et d'usure dans les zones de contact. L'approche 2D présente l'avantage d'être rapide et de donner des résultats satisfaisants par rapport à des machines d'essais d'usure, mais nécessite des recalages. L'approche 3D apporte une précision accrue mais est néanmoins actuellement trop coûteuse en vue de simuler des milliers de cycles [2].

### MÉTHODE

L'enjeu de ce travail est de développer un modèle numérique de prédiction des efforts de contact vus par les douilles du système VSV en

environnement moteur de manière fiable et en des temps de calculs adaptés au pré-dimensionnement en bureau d'études. Le modèle numérique est placé sous l'hypothèse des solides rigides indéformables où seules les zones de contact se déforment de manière élastique selon une loi de comportement définie. Il s'agit de la résolution d'un problème cinématique à forte non-linéarité appliqué à un système multi-corps soumis à des chargements variables et combinés. Ce problème de contact est tout d'abord traité en 2D avec un chargement simplifié de l'aube. Le problème est décrit analytiquement selon une démarche classique de passage local-global et résolu par la méthode de Newton-Raphson. L'écriture analytique du problème permet d'identifier les paramètres importants de modélisation. La maîtrise de la configuration initiale du redresseur en fonction des jeux et des positions relatives des pièces est essentielle à la convergence de l'algorithme de résolution. Afin de prendre en compte de manière plus complète le chargement et les géométries considérées, une extension au cadre tridimensionnel est proposée.

### RÉSULTATS

La validation des modèles est réalisée par la confrontation des résultats obtenus à l'aide d'un outil de dimensionnement développé par Safran Aircraft Engines permettant d'estimer les pressions de contact maximales. L'objectif sera ensuite d'aboutir à un calcul d'usure sur des cycles de vol complets dans le but d'estimer la durée de vie des douilles du système VSV. La validation de ce modèle en perspective s'appuiera sur des résultats d'essais expérimentaux ainsi que de données de retour de flotte.

### Références

- [1] Y. Xue, J. Chen, S. Guo, Q. Meng, J. Luo (2018) « Finite element simulation and experimental test of the wear behavior for self-lubricating spherical plain bearings ». *Friction*, **6**(3), pp. 297-306.
- [2] C. Paleczny, A. Selvi, E. Gabellini (2003) « 3D Kinematics Study with SAMCEF MECANO Motion

*on a nozzle of a turbojet engine - Pre and post-processing in SYNAMEC», SAMCEF User Days. France.*

# Comportement dynamique non-linéaire de structures bois assemblées par broches et ferrures

## Thomas Catterou<sup>1</sup>

1. Institut technologique FCBA – Centre technique industriel du bois, 33000 Bordeaux

**MOTS CLES :** Assemblages bois, Modes non-linéaires, Dynamique

### INTRODUCTION

La construction bois connaît un essor important du fait de sa faible empreinte environnementale, notamment la construction grande hauteur qui minimise l'empreinte au sol dans les villes. Néanmoins, la légèreté du bois par rapport aux autres matériaux de construction le rend plus sensible aux vibrations induites par le vent ou d'autres sources.

Les structures bois ont un bon comportement face au séisme dans des pays très touchés comme le Japon. Néanmoins, l'origine des phénomènes dissipatifs dans ces structures est mal connu et par conséquent est très peu valorisé dans les règlements de construction.

Depuis quelques années, le FCBA étudie le comportement dynamique de structure en bois avec notamment des essais sur table sismique. Des mesures récentes ont permis d'identifier des modes non-linéaires liées aux chocs et frottement dans les assemblages dans une structure poteau-poutre.

### PRESENTATION DES ESSAIS

Des essais dynamiques ont été réalisés sur un portique contreventé avec des assemblages broches-ferrure (Figure 1). Les broches sont insérées de force dans le bois mais avec du jeu dans la ferrure.



Figure 1 – Structure poteau-poutre contreventé, zoom sur un assemblage après un essai destructif

Les essais dynamiques ont consisté en une analyse modale opérationnelle et en l'application d'un bruit blanc puis d'un sinus balayé montant puis descendant sur la structure avec la table sismique.

### RESULTATS D'ESSAIS

Les essais entretenus (bruit blanc, sinus balayé) ont mis en avant un premier mode à une fréquence très inférieure au premier mode linéaire théorique. Au-dessus de cette fréquence, on observe une forte présence d'harmonique dans la structure (Figure 2).

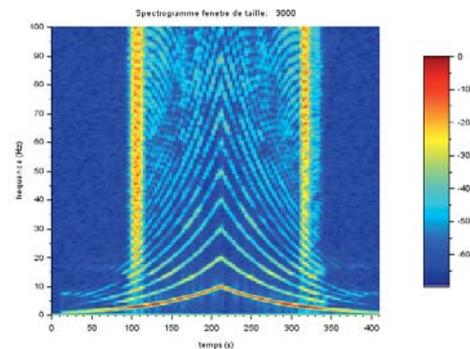


Figure 2 – Diagramme temps-fréquence en haut de la structure pour une sollicitation sinus balayé

Le mode de la structure identifié avec les essais entretenus a toutes les caractéristiques d'un mode non-linéaire (saut, dépendance au sens de balayage et à l'amplitude) mais n'est néanmoins non visible par analyse modale opérationnelle. Des résonances internes sous-harmonique ont aussi été observées.

### CONCLUSION

Ces premiers essais vont dans le sens d'une meilleure compréhension du comportement dynamique des structures bois. Il est suspecté que sont les jeux et frottements au niveau des assemblages qui provoquent ces non-linéarités. Le passage entre un état d'adhérence bois-métal et un état de glissement permettrait d'expliquer la présence d'un mode non-linéaire et la transition entre deux types de comportement bien distinct. Des études sont en cours pour approfondir la compréhension de ces essais, notamment par le biais de modélisations analytiques et numériques.



## Effect of sandblasting on composite surface quality and bonded joints shear strength

Bechikh<sup>1,2</sup>, O. Klinkova<sup>1</sup>, Y. Maalej<sup>2</sup>, I. Tawfiq<sup>1</sup>, R. Nasri<sup>2</sup>

1. ISAE- SUPMECA, QUARTZ EA 7393 laboratory, 3 Fernand Hainaut street, 93407 Saint-Ouen, France

2. ENIT, MAI laboratory, Farhat Hached el Manar university campus, 1002 Tunis, Tunisia

**KEYWORDS** : Composite, Structural bonding, Sandblasting, Peel ply, Surface topography, Surface arithmetic mean height, Contact angle, Surface free energy, Shear strength.

### ABSTRACT

Polymer composites are widely used in automotive, aerospace and marine fields [1, 2, 3] thanks to their wide range of unique benefits such as light weight, long-term cost savings, corrosion resistance, and superior longevity. Joining processes are unavoidable in manufacturing composites' laminate components especially those with complex geometries and large sizes. The most common and profitable composite key joining technology is structural bonding. Nevertheless, composites' poor surface finish, non-elevated surface free energy and surface free energy polar component in their raw state [4], limited their use in hybrids and adhesively bonded structures. Therefore, a surface treatment procedure should be established before bonding in order to enhance composites' adhesion quality.

Sandblasting is a low cost efficient abrasion treatment that is usually reserved for metallic materials. However it is gradually being used as a surface treatment for composites and polymers [2]. In this research, the efficiency of such treatment in enhancing flax fiber reinforced polymer adhesion quality compared to traditional mechanical surface treatments such as peel ply is studied. Trials revealed that sandblasting significantly enhanced the adhesion properties of the composite compared to peel ply. Sandblasted specimens were characterized by a non-homogeneous surface topography, the highest surface arithmetic mean height ( $S_a$ ) along with the highest surface free energy ( $\gamma_s$ ) and surface free energy dispersive component ( $\gamma_d \gamma_s$ ). Yet, fiber damage and sand residue were noted yet the treated surface level. These side effects could be reduced by opting for less harsh abrasive sand and more sophisticated cleaning processes.

### REFERENCES

- [1] G. Yang, T. Yang, W. Yuan, and Y. Du (2019) «The influence of surface treatment on the tensile properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites-bonded joints», *Composites Part B: Engineering*, 160:446–456.
- [2] L. Sorrentino, W. Polini, C. Bellini, and G. Parodo (2018) «Surface treatment of CFRP: influence on single lap joint performances», *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 85:225–233.
- [3] H. Saidane, D. Scida, M. Assarar, and R. Ayad (2017) «Damage mechanisms assessment of hybrid flax-glass fibre composites using acoustic emission», *Composite Structures*, 174:1–11.
- [4] A. Baldan (2012) «Adhesion phenomena in bonded joints », *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 38:95–116.



## Effet du cycle de polymérisation sur la création de pores dans les joints adhésifs structuraux de type époxy

C. Badulescu<sup>1</sup>, M. Diakhaté<sup>2</sup>, V. Dumont<sup>3</sup>, J. Adrien<sup>4</sup>, M. Bunea<sup>1</sup> et D. Thévenet<sup>1</sup>

1. ENSTA Bretagne, IRDL-UMR CNRS 6027, F-29200 Brest, France

2. Univ. Bretagne Occidentale, IRDL-UMR CNRS 6027, F-29600 Morlaix, France

3. Safran Reosc, Engineering & Integration Department, 91280 St, Pierre-du-Perray, France

4. Univ. Lyon, INSA Lyon, UMR CNRS 5510, Laboratoire MATEIS, F-69621, Villeurbanne Cedex, France

**MOTS CLES :** collage structural, pores, micro-tomographie aux rayons X, polymérisation

### RESUME

Le collage structural est de plus en plus utilisé dans différents secteurs industriels (aéronautique, spatial, etc.) du fait des nombreux avantages qu'offrent cette technique. La qualité des liaisons d'un joint collé dépend de plusieurs conditions de mise en œuvre mais également des défauts initiaux présents au sein du joint [1]. Ces défauts peuvent prendre la forme de pores, de tailles diverses, qui pourraient affecter la bonne résistance mécanique de l'assemblage [2]. Ces pores peuvent engendrer des concentrations de contraintes indésirables et qui sont susceptibles d'affaiblir localement la tenue de l'assemblage. Comme ils sont créés pendant le processus de collage, l'hypothèse selon laquelle les conditions de collage et de polymérisation devraient influencer leurs propriétés est bien fondée. Afin de valider cette affirmation, des échantillons collés ont été réalisés au moyen d'un adhésive de type époxy et en appliquant différents cycles de polymérisation. En particulier, l'influence de la température de cuisson, atteinte pendant le cycle de polymérisation a été étudiée. Les pores ainsi créés ont ensuite été observés et étudiés par micro-tomographie aux rayons X. Les performances de la technique de segmentation développée pour le traitement des données ont été préalablement étudiées sur des données synthétiques, afin d'identifier les limites de la méthodologie proposée et de quantifier l'incertitude des grandeurs calculées. Enfin il a été constaté qu'une température de polymérisation plus élevée, peut induire des phénomènes de croissance des pores notables [3] (principalement la dilatation et la coalescence). En particulier, cette croissance semble être prédominante au milieu de l'épaisseur des joints, ce qui se traduit par une diminution observable de la section efficace.

### Références

- [1] V. Dumont, C. Badulescu, J. Adrien, N. Carrere, D. Thévenet, E. Maire (2021) « *Experimental investigation of porosities evolution in a bonded assembly by means of X-ray tomography* », The Journal of Adhesion, **97**(6), pp. 528-552.
- [2] V. Dumont, C. Badulescu, G. Stamoulis, J. Adrien, E. Maire, A. Lefèvre, D. Thévenet (2020) « *On the influence of mechanical loadings on the porosities of structural epoxy adhesives joints by means of in-situ X-ray microtomography* », International Journal of Adhesion and Adhesives, **99** pp. 000-000.
- [3] V. Dumont, C. Badulescu, G. Stamoulis, J. Adrien, E. Maire, A. Lefèvre, D. Thévenet (2020) « *On the effect of the curing cycle on the creation of pores in structural adhesive joints by means of X-ray microtomography* », The Journal of Adhesion, <https://doi.org/10.1080/00218464.2020.1728257>.



## Interface models for micro-cracking damage in adhesives

M. L. Raffa<sup>1,\*</sup>

1. ISAE - Supméca, Institut supérieur de mécanique de Paris, Laboratoire QUARTZ EA 7393 – SUPMECA, Paris. Email : [maria-letizia.raffa@supmeca.fr](mailto:maria-letizia.raffa@supmeca.fr)

**KEYWORDS:** Bonding, microcracks, imperfect interfaces, asymptotic theory, homogenization.

### INTRODUCTION

Within the last decades, adhesive bonding became a very common assembly technique in many industrial sectors, such as aeronautical, civil, automotive and biomedical. Bonding provides several advantages, including reduced stress concentrations, higher corrosion resistance, water tightness, and the ability to join materials with dissimilar properties. Nevertheless, one of the main concerns limiting the use of adhesive joints is their long-life durability when exposed to service conditions. Corrosion and aging may cause micro-cracking phenomena that can be measured via non-destructive techniques. Another drawback is the multifactorial and multiscale nature of the damage phenomena occurring in the adhesive joints, which make it more complex to predict their strength.

In some structural adhesives, the tensile stress–strain behavior is typically characterized by an initial linear-elastic phase, followed by a softening one and failure. This nonlinear constitutive behavior suggests that a micro-cracking process could occur.

This work proposes an analytical modeling approach for thin adhesives providing an interface condition that allows for a suitable replacement of adhesive layers in numerical simulations. The proposed nonlinear and rate-dependent imperfect interface laws take into account for the micro-cracking damage evolution and they can describe brittle and ductile stress–strain behaviors of adhesives.

### METHOD AND RESULTS

The analytical imperfect interface models are obtained by combining asymptotic theory and micromechanical homogenization in the framework of two dual approaches, strain and stress-based. Soft and hard imperfect interface laws are derived via the matched asymptotic theory at higher-order. The micromechanical homogenization is used to include in the “macroscopic” interface law the effective material properties of the adhesive with micro-cracking damage. Depending on the chosen homogenization

approach the interface model allows to describe both ductile and brittle damage behaviors. An analytical damage evolution law is also developed and included in the interface models.

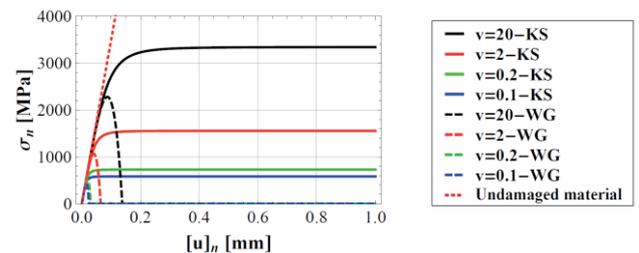


Figure 1: Interface law for ductile (solid lines) and brittle (dashed lines) damage behavior.

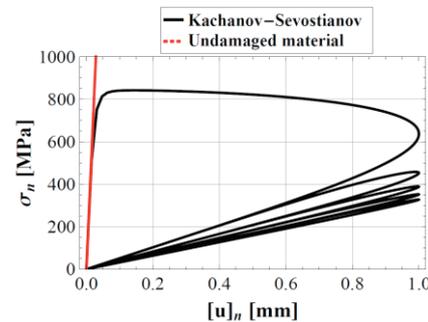


Figure 2: Interface law for ductile damage behavior under a cyclic load.

### CONCLUSION

Provided numerical results in both terms of constitutive and structural behavior are promising and suggest that the interface models would represent a suitable strategy for a macroscopic modeling of adhesives with micro-cracking damage regardless of whether they have a ductile or brittle behavior.

### References

- [1] Raffa, M. L., Rizzoni, R., Lebon, F. (2021). A Model of Damage for Brittle and Ductile Adhesives in Glued Butt Joints. *Technologies*, 9(1), 19.
- [2] Raffa, M. L., Lebon, F., Rizzoni, R. (submitted). A micromechanical model of a hard interface with micro-cracking damage.



## Assemblage alliage d'aluminium/acier par Cold Spray

Amela KUSURAN<sup>1,2</sup>, Ludovic VITU<sup>1</sup>, Geoffrey DARUT<sup>1</sup>, David MERCS<sup>2</sup> et Marie-Pierre PLANCHE<sup>1</sup>

1. ICB-PMDM, UMR 6303, CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, 90010 Belfort, France  
[amela.kusuran@utbm.fr](mailto:amela.kusuran@utbm.fr) ; [ludovic.vitu@utbm.fr](mailto:ludovic.vitu@utbm.fr) ; [geoffrey.darut@utbm.fr](mailto:geoffrey.darut@utbm.fr) ; [marie-pierre.planche@utbm.fr](mailto:marie-pierre.planche@utbm.fr)  
 2. Lisi AUTOMOTIVE, 2 rue Juvénal Viellard, 90600 Grandvillars, France [david.mercs@lisi-group.com](mailto:david.mercs@lisi-group.com)

**MOTS CLES :** Projection thermique, alliage d'aluminium, acier, texturation laser, automobile

### INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, l'allègement des véhicules est un enjeu majeur des constructeurs automobiles de manière à réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre avec un objectif fixé à -15% d'ici 2025 [1] pour les véhicules qui conservent une motorisation thermique, ou à augmenter l'autonomie des véhicules électriques. L'usage largement répandu des aciers au niveau des éléments de structure d'une voiture (caisse en blanc), dont les épaisseurs sont réduites au maximum grâce à l'augmentation de leurs résistances mécaniques, fait progressivement place à des assemblages hybrides entre des aciers et des matériaux avec une densité plus faible comme les alliages d'aluminium. Actuellement différentes méthodes d'assemblage dites « multi matériaux » existent comme le clinchage, le rivetage, le collage, le vissage [2] mais rencontrent des limitations de mise en œuvre et/ou de résistance mécanique.

L'association originale d'une texturation/micro-usinage des surfaces à assembler à une projection supersonique à froid de matière sous forme de poudre permet de proposer une alternative intéressante aux procédés d'assemblage multi matériaux classiques. Ce procédé innovant (LISI  $\mu$ -MACH ASSEMBLY PROCESS® : micro Mechanical Anchoring Cold Hybrid Assembly Process) combine la réalisation d'un réseau de trous micrométriques par impacts laser par exemple à une projection thermique de type Cold Spray pour laquelle un cordon d'assemblage peut être formé grâce à la déformation plastique et à l'empilement des particules projetées sans fusion.

Cette technique a montré de meilleurs résultats d'adhérence comparativement à d'autres méthodes de préparation de surface comme le sablage [3]. La texturation simultanée des deux matériaux permet de générer une première accroche mécanique (Figure 1), renforcée par la déposition du cordon de liaison par Cold Spray. Ce n'est donc plus un élément qui a été ajouté pour lier deux matériaux comme dans les assemblages mécaniques classiques par exemple mais

bel et bien un nouveau procédé qui permet d'assembler ces deux matériaux disjoints par fabrication additive in situ.

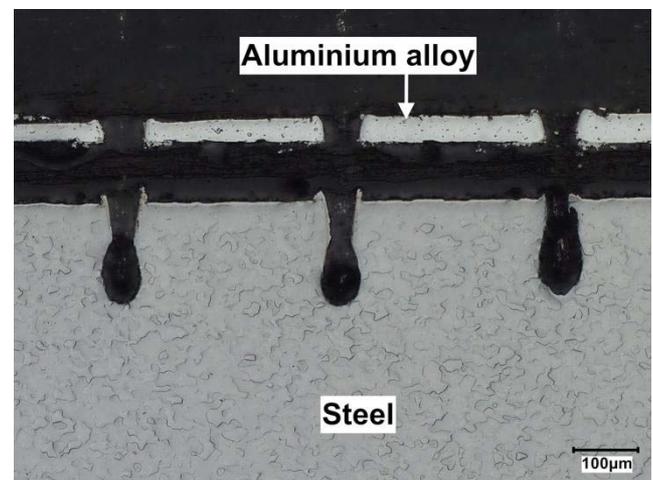


Figure 1: Texturation simultanée de l'alliage d'aluminium et de l'acier.

### Références

- [1] Règlement (UE) 2019/631 du Parlement européen et du Conseil du 17 avril 2019 établissant des normes de performance en matière d'émissions de CO<sub>2</sub> pour les voitures particulières neuves et pour les véhicules utilitaires légers neufs, et abrogeant les règlements (CE) n° 443/2009 et (UE) n° 510/2011  
 [2] Y. Chastel, L. Passemard. « Joining technologies for future automobile multi-material modules », *Procedia Engineering*, 81 (2014), pp. 2104 – 2110, 2014.  
 [3] R. Kromer, « Effects on adhesion mechanisms of prior-surface treatments before thermal spraying: Thermal barrier coating », Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2016.



## Fretting fatigue dans un câble d'ancrage offshore: couplage numérique-expérimental pour prédiction de la durée de vie

A. Sébastien Montalvo<sup>1</sup>, B. Siegfried Fouvry<sup>2</sup>, C. Michaël Martinez<sup>3</sup>

1. et 2. Laboratoire de Tribologie et Dynamique des systèmes, Ecole Centrale de Lyon, France

3. IFP Energies Nouvelles, Solaize, France

**MOTS CLES :** fretting-fatigue, câble, acier, simulation numérique, expérimental

### INTRODUCTION

L'éolien offshore flottant est une technologie en plein développement, qui permet l'installation de fermes éoliennes dans des zones en mer de plus grande profondeur. Un flotteur, sur lequel est installé l'éolienne, est relié au fond marin par des lignes d'ancrage. Elles sont soumises à des efforts de tension et de flexion variables sous l'effet de la houle, du vent et de la poussée d'Archimède. Cela induit un déplacement relatif des fils du câble les uns par rapport aux autres, soit un phénomène de fretting. Combiné à la fatigue, ceci peut générer l'apparition et la propagation de fissures, et donc la rupture des fils. L'objectif de cette étude est de prédire la durée de vie des fils connaissant le chargement global appliqué au câble.

### SIMULATIONS NUMERIQUES

Une simulation numérique sous Abaqus® d'un câble permet d'obtenir les chargements locaux s'exerçant sur les fils : contraintes et forces de contact. Le câble simulé est monotonon, constitué de 371 fils enroulés en hélice, organisés en 12 couches, protégés par une gaine externe en PEHD (Figure 1). L'utilisation d'éléments poutres pour les fils limite le coût calcul.

Une fois les chargements locaux obtenus, certains points de contact sont simulés avec des éléments volumiques. L'obtention des champs de contraintes dans les fils permet d'appliquer un critère de fatigue multiaxiale d'identifier les fils qui sont susceptibles de rompre, du moins suivant cette modélisation.

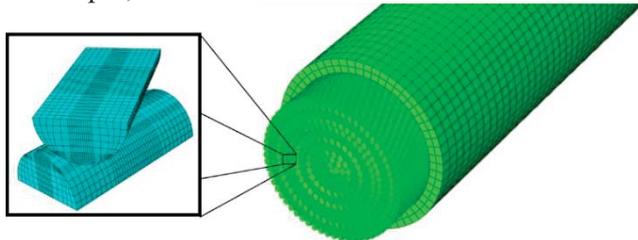


Figure 1 : simulations numériques du câble et d'un contact entre deux fils

### EXPERIMENTAL

Afin de vérifier la validité de ces prédictions, des essais de fretting-fatigue reproduisant les chargements sélectionnés sont menés. Cette démarche numérique-expérimental est largement inspirée de celle développée par Saïd [1]. Un fil-éprouvette soumis à une contrainte cyclique  $\sigma(t)$  est en contact avec un fil-poinçon. Une force normale  $P$  et un déplacement cyclique  $\delta(t)$  (d'amplitude  $\delta^*$ ) de ce poinçon sont imposés. Une première série d'essais (Figure 2) a montré l'influence de  $\delta^*$  sur la durée de vie, à  $\sigma$  et  $P$  constants. Des essais avec d'autres conditions de chargement sont en cours.

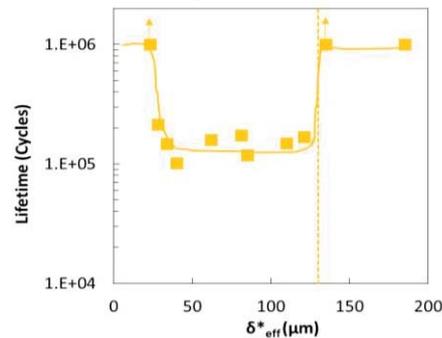


Figure 2: influence de  $\delta^*$  sur la durée de vie

La simulation sera ajustée en fonction des résultats des essais.

### CONCLUSION

L'approche numérique en deux étapes permet un coût calcul raisonnable, et les essais expérimentaux serviront à adapter le critère de rupture des fils. L'objectif est de pouvoir prédire la durée de vie d'un fil en n'importe quel endroit du câble.

### Références

- [1] J. Said, et al 2020. « A multi-scale strategy to predict fretting-fatigue endurance of overhead conductors ». Tribology International 143, (March 2020), 106053.



## Caractérisation et modélisation multi-échelle du comportement en fretting-fatigue des conducteurs pour le transport d'énergie

J. SAID<sup>1</sup>, S. FOUVRY<sup>2</sup>, C. YANG<sup>1</sup>, F. HAFID<sup>1</sup>, M. COULANGEON<sup>3</sup>, J. BROCARD<sup>3</sup>

1. Rte (Réseau de Transport d'Electricité), Paris la Défense, France

2. LTDS, Ecole Centrale de Lyon, Ecully, France

3. Dervaux, Le Chambon-Feugerolles, France

**MOTS CLES :** fretting-fatigue, méthode des Eléments Finis, conducteurs aériens, aluminium

### INTRODUCTION

Les conducteurs aériens utilisés pour le transport d'énergie sont soumis à diverses sollicitations durant leurs années d'exploitations : vibrations éoliennes, efforts de traction ou encore l'action des pinces serrage. Ces chargements peuvent induire des phénomènes de fretting entre les brins d'un conducteur, apparaissant lorsque deux corps en contact subissent un déplacement relatif de faible amplitude. Lorsque des sollicitations de fatigue s'ajoutent au fretting, on parle alors de fretting-fatigue et la durée de vie des conducteurs est notablement impactée. L'objectif est ainsi de proposer un outil de prévision du comportement à long terme des conducteurs pour pouvoir adapter les politiques de maintenance et de remplacement du réseau électrique français.

### Modélisation multi-échelle des conducteurs

La stratégie adoptée repose sur une modélisation numérique (selon la méthode des éléments finis) à deux échelles. Un premier modèle macroscopique permet de représenter une portion complète de conducteur ainsi qu'une pince de serrage. Il permet d'évaluer la distribution de sollicitations de fretting et de fatigue au sein des composants du système pour n'importe quel cas de chargement extérieur. Le second modèle se concentre sur l'échelle locale et un unique contact entre deux brins d'aluminium.

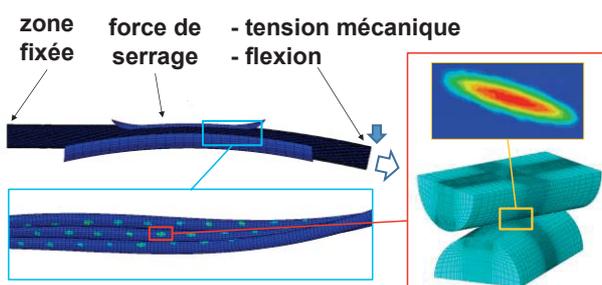


Figure 1

Ce modèle permet de simuler les contacts les plus critiques détectés par le premier modèle et d'estimer le risque de rupture à l'aide de critères de fatigue multiaxiaux.

### Approche expérimentale locale et globale

Comme pour la modélisation numérique, les essais expérimentaux réalisés ont concerné deux échelles. Un banc d'essai de fretting-fatigue double vérin a été utilisé pour l'échelle locale en reproduisant un contact inter-brin et déduire les durées de vie associées. Ces essais ont également servi à calibrer les critères de fatigue multiaxiaux employés dans la modélisation pour la prévision de durée de vie avant rupture. D'autre part, des conducteurs complets ont pu être testés en vibration dans une pince afin d'éprouver la démarche globale et avoir des informations supplémentaires sur les faciès de rupture, les brins concernés et leur localisation.



Figure 2

### CONCLUSION

La démarche proposée s'appuie sur des modèles numériques et bancs expérimentaux pour caractériser le comportement en fretting-fatigue de conducteurs aériens. Pour chaque cas, deux échelles distinctes ont été considérées pour avoir la meilleure description physique des phénomènes mis en jeu. L'outil obtenu pourra à terme aider à la gestion des actifs et l'optimisation de la maintenance du réseau de transport électrique français.



## L'évaluation de l'endurance d'un conducteur en hybridant simulation numérique et modélisation statistique

A. Belkhabbaz<sup>1</sup>, S.I. Raghni<sup>1</sup>, M. Gueguin<sup>1</sup>, F. Hafid<sup>2</sup>, J. Said<sup>2</sup>, J.-M. Ghidaglia<sup>3</sup>

<sup>3</sup> CMLA, ENS Paris-Saclay, CNRS, Université Paris-Saclay, 94230 Cachan, France

<sup>1</sup> Eurobios, 61 avenue du président Wilson, 94235 Cachan, France

<sup>2</sup> RTE, Direction R&D-I, 7C place du drôme, 92037 Paris la Défense, France

**Mots-clé:** *Conducteurs aériens, Fatigue-fretting, Modélisation éléments finis.*

En tant que gestionnaire du transport d'électricité haute-tension en France, RTE est particulièrement attentif au vieillissement des infrastructures constituant son parc, notamment les conducteurs électriques de lignes aériennes. Ces conducteurs sont constitués de plusieurs dizaines de brins torsadés sur plusieurs couches, de même matériau ou de matériaux différents. L'une des configurations les plus répandues se compose de brins circulaires en acier dans les couches centrales du conducteur et de brins circulaires en aluminium pour les couches externes. La fabrication de ces conducteurs, dits ACSR (*Aluminium Conductors Steel Reinforced*), est régie par des normes internationales [1].

Ces conducteurs aériens subissent au cours de leur durée d'exploitation un grand nombre de cycles de sollicitations par interaction avec le vent. Les vibrations induites provoquent des frottements entre les brins conducteurs qui peuvent conduire à un amorçage de fissures au niveau du contact entre brins. La prédiction précise de l'initiation probable d'une fissure est un problème à plusieurs échelles qui n'est pas facilement traité avec un modèle simple. L'approche proposée ici est basée sur un modèle numérique, appelé modèle filaire[2], qui cherche à détecter les zones critiques en simulant à la fois les différentes interactions entre les brins et aussi entre la pince de suspension et le conducteur. Ce travail se focalise sur la calibration et la validation du modèle en faisant des comparaisons avec des résultats disponibles dans la littérature [3,4].

Après cette validation, un modèle de substitution (méta-modèle) est proposé pour remplacer le modèle filaire initial. Le modèle de substitution se rapproche de la relation entrée-sortie du modèle filaire, qui utilise une approche par éléments finis coûteuse en terme de temps de calcul. L'objectif ici est de réduire le coût d'évaluation qui permettra à la fois une analyse de sensibilité plus rapide des paramètres d'entrée du modèle et aussi explorer plus facilement d'autres zones d'intérêts pour RTE.

### REFERENCES

- [1] Norme Européenne. *Conducteurs pour lignes aériennes – Conducteurs à brins circulaires, câblés en couches concentriques*. NF EN 50182, Décembre 2001.
- [2] A. Belkhabbaz, M. Gueguin, F. Hafid, C. Yang, J.-M. Ghidaglia, O. Allix Méthodologie d'analyse fine des contacts critiques au sein d'un conducteur aérien via un modèle numérique filaire. 14<sup>ème</sup> colloque National en calcul des structures CSMA 2019.
- [3] S. Lalonde, R. Guibault, F. Légeron. Modeling multilayered wire strands, a strategy based on 3D finite element beam-to-beam contacts – Part I : Model formulation and validation, *International Journal of Mechanical Sciences*, 281-296, 2017
- [4] F. Foti, L. Matinelli, Mechanical modeling of metallic strands subjected to tension, torsion and bending, *International Journal of Solids and Structures* (2016).



## Modélisation de la fatigue d'assemblages métalliques par une approche locale

M. Nutte<sup>1</sup>, S. Kruch<sup>1</sup>, P. Kanouté<sup>1</sup>, B. Langrand<sup>2</sup>, B. Delpuech<sup>3</sup> et V. Jacques<sup>3</sup>

1. ONERA Châtillon, {maxime.nutte, serge.kruch, pascale.kanoute}@onera.fr

2. ONERA Lille, bertrand.langrand@onera.fr

3. Dassault Aviation Saint Cloud, {benjamin.delpuech, vincent.jacques}@dassault-aviation.com

**MOTS CLES :** fatigue, assemblages métalliques, sollicitations multiaxiales, fissuration, modèle

Dans le domaine aéronautique, les structures d'avions sont composées de tôles, très souvent en aluminium, assemblées à l'aide de fixations en acier, titane ou Inconel. Le dimensionnement en fatigue de ces assemblages constitue une problématique de recherche complexe, car impliquant différents phénomènes (non-linéarité du comportement des tôles, contact avec frottement, comportement de la vis...), mais néanmoins majeure pour les industriels du secteur qui ont parfois recours à de lourdes campagnes expérimentales pour valider leurs choix technologiques. Il est donc nécessaire de proposer des méthodologies robustes à différents stades du dimensionnement permettant de garantir leur design en termes de tenue en service et limiter les risques lors du développement d'un programme avion.

L'étude vise à développer une méthode de prévision de la tenue en fatigue d'assemblages soumis à des conditions de sollicitations multiaxiales variées. Il s'agira d'estimer la durée de vie de pièces assemblées par une approche locale reposant sur une modélisation explicite de la fixation et des efforts induits.

Dans ce but, une importante campagne expérimentale a été entreprise avec des essais de complexité croissante allant de la simple éprouvette de caractérisation (du comportement élasto-plastique cyclique et de la fatigue en amorçage de fissure) jusqu'à des assemblages complexes sollicités biaxialement sur une machine 4 vérins. En s'appuyant sur une multi-instrumentation conséquente (corrélation d'images numériques, méthode du potentiel électrique, technique d'émission acoustique), ces essais vont permettre d'identifier les paramètres de la loi de comportement et du modèle de fatigue de l'alliage d'aluminium de l'étude, en mettant l'accent sur leurs formulations multiaxiales.

Les sollicitations observées sur une structure avion n'étant pas périodiques mais pouvant être aléatoires, un modèle de fatigue incrémentale en temps est proposé afin de s'affranchir de la notion de cycle.

Un effort important a été dévolu à la modélisation de l'évolution de la contrainte moyenne pour ce type d'approche incrémentale. Des travaux ont notamment été proposés dans [1] et [2], où les auteurs suggèrent des contraintes moyennes *évolutives* incluant l'histoire du chargement pour l'étude de la durée de vie de composites. Outre cet effet de contrainte moyenne, le modèle de fatigue proposé prend en compte le cumul de dommage non linéaire et est écrit dans un formalisme multiaxial au travers d'invariants du tenseur des contraintes. Le critère d'amorçage adéquat et le formalisme final seront validés sur les essais biaxiaux.

Un point important sera aussi dédié à l'analyse de l'amorçage de fissures au niveau des concentrations de contrainte très présentes dans un assemblage. Ces effets de gradients pourront être introduits au travers d'approches probabilistes permettant de prendre en compte l'impact du volume de matière sollicité.

Ces différents développements seront illustrés et validés au travers de modélisations éléments finis 3D réalisées sur des assemblages représentatifs de composants industriels en prenant en compte toutes leurs complexités comme les différents contacts (vis/tôle et tôle/tôle) et les conditions limites initiales (chargements cycliques, pré-tension de serrage du boulon...).

### Références

[1] L. Angrand, 2016, « *Modèle d'endommagement incrémental en temps pour la prévision de la durée de vie des composites tissés 3D en fatigue cyclique et en fatigue aléatoire* », PhD thesis, Ecole Normale Supérieure de Cachan.

[2] O. Sally, 2020, « *Stratégies de calcul pour la prévision de durée de vie des structures composites soumises à des chargements complexes : Application aux composites Oxyde/Oxyde* », PhD thesis, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay.



Jérôme Mercier <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> SNCF, Comité Technique Assemblages Boulonnés, SNCF Voyageurs, 21 avenue du Président Allende - 94407 Vitry-sur-Seine Cédex, France

Luc Moyart <sup>(2)</sup>

<sup>(2)</sup> ALSTOM, Fastener Expert, 48 Rue Albert Dhalenne, 93400 Saint-Ouen, France

## LES INCONTOURNABLES D'UNE MONTEE EN COMPETENCE REUSSIE

### Résumé :

Dans le cadre des travaux du Groupe de Travail Visserie Ferroviaire réunissant des clients, des constructeurs, des partenaires, des mainteneurs, des exploitants du réseau ferroviaire Français d'autres groupes de travail connexes, la rédaction de spécifications permet de rationaliser et de standardiser les actions dans nos sociétés respectives.

Ces résultats doivent être déclinés au travers des modules de formations accessibles au personnel depuis l'ingénierie jusqu'à la production en passant par tous les services intermédiaires et transverses.

A titre d'exemple, nous avons évoqué lors du colloque de 2019 la nécessité absolue de respecter les niveaux de sécurité et les exigences exportées. Cette sécurité ne peut être complète et appliquée que si et seulement si les entreprises mettent en place un très haut niveau d'exigences sur les formations dispensées et sur le suivi de toutes les personnes en lien avec les assemblages boulonnés.

Quel que soit le service ou le département, nous devons considérer que, du concepteur jusqu'au monteur, chacun doit en permanence être informé du contenu et des évolutions normatives reprises dans les standards internes définissant la feuille de route de l'entreprise.

Les experts doivent s'assurer que l'arsenal de formation soit complet et disponible.

Ils doivent s'assurer que tous reçoivent l'exhaustivité des formations disponibles et vérifient également la bonne compréhension du personnel aux formations dispensées.

Chaque nouveau document doit être accompagné d'une formation afin de s'assurer la bonne compréhension du contenu.

Par ailleurs, chaque évolution de ces documents doit faire aussi l'objet d'une présentation documentée et détaillée afin de ne pas laisser place à l'interprétation des contenus.

Dans le cas de rapprochement de sociétés, de fusion, d'entrée sur le marché de nouveaux acteurs ou de rachat d'entités, il est crucial d'avoir à disposition un ensemble de document univoques, clairs et compréhensibles par tous afin d'obtenir des montages boulonnés, avec la même rigueur, le même suivi et le même niveau de sécurité quelle que soit la partie du monde où cela a été étudié ou fabriqué.

Préparer l'intégration de ces nouvelles entités au travers la formation est un objectif qui permettra de maîtriser la dynamique et la motivation des équipes ainsi que la sécurité.

Notre Groupe de Travail Visserie crée une synergie entre les différentes sociétés du ferroviaire, les experts constituant ce groupe ont une connaissance de tous les montages et assemblages constituant le matériel roulant. Ils prennent donc en compte tous les retours d'expériences et les mettent en communs afin de constituer une base de données extrêmement solide qui sera intégrée et déclinée ensuite lors des formations aux équipes.

Dans ce contexte, comment réussir la montée en compétence des différents intervenants dans l'assemblage boulonné ?



## Mise au point d'un outil d'assistance par réalité augmentée au serrage de brides boulonnées avec joint d'étanchéité

F. Ledrappier<sup>1</sup>, L. Allegre<sup>1</sup>, V. Perrot<sup>2</sup>, Y. Kerkhof<sup>2</sup>, Y. Raymond<sup>3</sup>, M. Lorimier<sup>3</sup>,

1. *TECHNETICS Group France SAS – Laboratoire d'Etanchéité maestral – 2, rue James Watt – 26700 Pierrelatte*

2. *CEA Marcoule, 30207 Bagnols-sur-Cèze Cedex - DES/ISEC/DE2D*

3. *SAM Outillage S.A.S. - 10 rue Camille de Rochetaillée - CS 10528 - 42 007 Saint-Étienne*

**MOTS CLES :** Etanchéité, boulonnerie, assemblages, réalité augmentée

### INTRODUCTION

L'obtention et le maintien de l'étanchéité dans un assemblage à brides boulonnées, quel que soit le type de joint utilisé, repose sur la combinaison de plusieurs facteurs, parmi lesquels :

- La conception du joint,
- Le comportement mécanique de l'assemblage sous charge,
- La maîtrise du serrage.

L'expérience étendue de TECHNETICS GROUP dans la conception des joints métalliques haute performance, permet un choix approprié du type de joint, du revêtement d'étanchéité en fonction de l'application ciblée, ainsi que des dimensions et des efforts requis pour obtenir une intégration du joint conduisant à une étanchéité optimale.

Le développement d'outils de simulation numérique permet d'appréhender avec précision le comportement des assemblages boulonnés et en particulier leur interaction avec le joint. Il est ainsi possible de déterminer, par le calcul, l'évolution de la compression du joint, résultant de la déformée des brides sous pression ou sous un chargement extérieur, et valider la capacité de l'assemblage à rester étanche sous un historique donné.

L'expérience de SAM dans le serrage contrôlé et la mise au point de clés Mécatroniques pilotées, communicantes et à cassure assurent un serrage au couple unique dans sa précision et sa facilité de mise en œuvre.

### DEVELOPPEMENT DE L'APPLICATION

Compte tenu des efforts de R&D et des progrès réalisés pour maîtriser les différents paramètres, l'essentiel des défauts d'étanchéité est désormais considéré comme imputable à des problèmes liés à la maîtrise du montage des joints et au serrage des brides, pour diverses raisons, dont le manque d'expérience qui peut conduire, sans en être conscient, à ne pas respecter des points clés des procédures de serrage et sans possibilité de contrôle a

posteriori. A partir de ce constat, et grâce à l'expérience du CEA Marcoule dans la conception d'outils de réalité mixte dédiés à la préparation et l'assistance aux interventions en milieux hostiles, une application d'assistance au serrage de brides par la réalité augmentée a été mise au point. Le fonctionnement proposé repose sur :

- La définition d'une séquence de serrage optimal en bureau d'étude,
- L'identification de l'assemblage par les lunettes de réalité augmentée à l'aide d'un QR code,
- Le guidage de l'opérateur par réalité augmentée dans la séquence de montage prédéfinie, en indiquant le boulon à serrer,
- L'interfaçage avec une clé dynamométrique instrumentée et connectée DYNASAM® permettant d'afficher en réalité augmentée le couple appliqué en temps réel, de visualiser la consigne et de déclencher la clé au couple requis avant de passer à l'étape suivante,
- L'application développée génère ensuite un rapport permettant de documenter l'intervention.



Figure 1: Contact bille sur plan.

### CONCLUSION

L'application développée permet d'assister l'opérateur, dans les opérations d'assemblages de brides boulonnées avec joint. Cette aide peut servir à la fois pour la formation de techniciens, l'accompagnement de personnel peu qualifié, mais aussi pour minimiser les risques d'erreurs humaines lors du montage de joint, permettre un suivi individuel des composants (par les QR-Code) ainsi

que d'avoir une traçabilité des opérations réalisées sur l'assemblage.

---

## Serrage - Travaux en cours et nouvelle approche pour l'exploitation des données de caractérisation

Zouhair Chaib(1), Christophe Delcher(1), Karim Demmou(2)

(1) CETIM

(2) Safran Aircraft Engines

La fiabilité d'un serrage au couple dépend en grande partie de la maîtrise de sa relation Couple/Tension. Aujourd'hui les référentiels normatifs (ISO 16047, NF E 25-039, etc) définissent les méthodes d'essai pour caractériser cette relation ainsi que les méthodes de calcul qui permettent de déterminer les coefficients de frottement dans une plage de serrage précise. Ces données sont primordiales pour le dimensionnement et la mise en œuvre du serrage des assemblages vissés.

De nombreux retours d'expérience montrent qu'il est délicat voir risqué d'exploiter des données issues de la littérature ou de configurations dont les paramètres ne sont pas strictement identiques (matériaux, dureté, revêtements, lubrification, état de surface, vitesse de serrage, etc). Quelle approche mener pour exploiter de manière fiable ces données ?

La présentation intégrera une première partie concernant le développement d'une nouvelle approche pour l'exploitation et la sauvegarde des données Couple/Tension incluant un retour d'expérience de la société SAFRAN SAE. Une seconde partie exposera les travaux R&D du CETIM en cours sur la thématique du serrage (Serrage pré-Couple + angle, serrage dans le domaine élastique, élasto-plastique et plastique).



---

## Tenue au glissement et au dévissage – Travaux en cours et Solution d'adhérence innovante

Christophe Delcher(1), Pierrick Pavallier(2), Stéphane Roll(3)

(1) CETIM

(2) HEF DURFERRIT

(3) ALSTOM

La maîtrise du coefficient d'adhérence ou facteur de frottement au plan de joint est une priorité dans le dimensionnement des assemblages mécaniques précontraints soumis à des sollicitations transversales de cisaillement. Cette problématique concerne tous les secteurs industriels. Actuellement, ces coefficients ou facteurs sont donnés soit arbitrairement par des normes soit déterminés expérimentalement lors de qualification produit mais restent dépendant de l'appréciation du concepteur. De plus, très peu de solutions permettent d'augmenter significativement l'adhérence au plan de joint de manière répétable et pérenne.

La présentation intégrera une première partie exposant un éventail des solutions existantes permettant d'augmenter l'adhérence entre les pièces assemblées, puis dévoilera une solution innovante développée par le CETIM et la société HEF incluant un retour d'expérience de la société ALSTOM. Une seconde partie présentera nos travaux R&D du CETIM en cours sur la thématique du dévissage et de la tenue au glissement.



## Comportement mécanique de réducteurs thermiques par platines boulonnées

M. Couchaux<sup>1</sup>, A. Ben Larbi<sup>2</sup>

1. INSA Rennes

2. CTICM

**MOTS CLES :** Performance thermique, isolant, rigidité en rotation, moment fléchissant.

### INTRODUCTION

La construction de bâtiments à énergie positive nécessite d'accorder un soin particulier à l'efficacité énergétique et notamment à la qualité thermique de l'enveloppe. Une bonne isolation, associée à un traitement judicieux des points singuliers et des interfaces entre matériaux et entre lots devient nécessaire. Dans la plupart des cas, les points singuliers sont des lieux d'interactions entre différentes exigences normatives et réglementaires.

Lorsqu'un élément extérieur, un balcon par exemple, traverse l'isolation extérieure et vient s'ancrer sur la structure support, la chaleur peut être transférée au niveau de ce point singulier. Une solution consiste à mettre en œuvre un rupteur thermique entre la poutre acier et le support. Ce rupteur va limiter les transferts de chaleur tout en transmettant des efforts tranchants lorsque l'élément extérieur est simplement appuyé et même un moment fléchissant dans le cas d'éléments en console. Des rupteurs industriels sont commercialisés sur le marché français mais s'avèrent assez onéreux, délicats à mettre œuvre et ne disposent pas d'avis techniques.

Une solution simple de réducteur thermique consiste à mettre en œuvre un plat entre le support acier et la platine boulonnée qui possède des propriétés isolantes suffisantes tout en garantissant une portance mécanique minimale. Ce plat intermédiaire peut être composé de bois ou PVC. Ce type de solution a été étudié dans le cadre du projet ADEME TREPOS et a pu être caractérisé mécaniquement au cours d'essais statiques et cycliques. En complément un modèle de calcul par éléments finis a été mis en œuvre et comparé aux résultats d'essais. Le comportement des assemblages dépend fortement de la configuration d'assemblage étudiée et de la possibilité d'étendre la zone comprimée engendrée par le moment fléchissant. Enfin un modèle analytique est proposé afin de déterminer la rigidité initiale en rotation de l'assemblage primordiale pour la détermination de la flèche d'un élément en console utilisant ce type de conception.

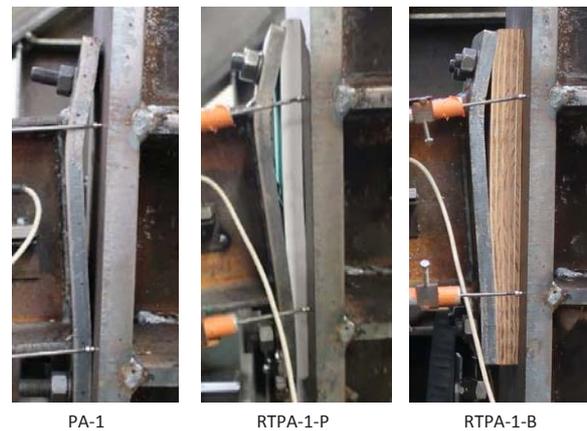


Figure 1: Réducteurs thermiques à la ruine

### Références

- [1] Nasdala L., Hohn B., Rühl R., Design of end-plate connections with elastomeric intermediate layer, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 63, p. 494-504, 2007.
- [2] Sulcova Z., Sokol Z., Wald F., Structural connections with thermal separation, *CESB 07 Prague Conference*, 672-677, 2007.
- [3] Cleary D.B., Riddell W.T., Camishion N., Downey P., Marko S., Neville G., Oostdyk M., Panaro T., Steel connections with fiber-reinforced resin thermal barrier filler plates under service loading, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 142, Issue 11, 2016.
- [4] Ben Larbi A., Couchaux M., Bouchaïr A., Thermal and mechanical analysis of thermal break with end-plate for attached steel structures, *Engineering Structures*, Vol. 131, pp. 362-379, 2017.
- [5] Hamel S., White S., Thermo-mechanical modelling and testing of thermal breaks in structural steel point transmittances, *Anchorage, AK*, 2016.
- [6] M.Couchaux, A.Ahlasawi, A. Ben Larbi, Monotonic and cyclic tests on beam to column bolted connections with thermal insulation layer, *Engineering Structures*, Vol 204, 109621, 2020.



---

## **Caractérisation et comportement à chaud des fixations en acier inoxydable**

Julien Moine(1), Christophe Delcher(1), Jean-Paul Amaro(2), Laurent Giboureau(3)

(1) CETIM

(2) UGIVIS

(3) LANFRANCO

Pour les matériaux de la famille des aciers inoxydables, les caractéristiques et leurs comportements en température sont relativement bien connus et renseignés dans la littérature ainsi que dans les référentiels normatifs. Pour autant, concernant les produits finis de fixations, en particulier en acier inoxydable austénitique écroui, très peu de données sont disponibles.

La présentation exposera les résultats d'une étude CETIM réalisée en collaboration avec le syndicat professionnel ARTEMA pour la commission R&D Fixations (regroupant les fabricants français de fixations). Cette étude repose principalement sur le développement de méthodes d'essai, ainsi que sur la caractérisation à chaud en traction directement réalisés sur des produits finis de fixations.

La présentation inclura un retour d'expérience des sociétés UGIVIS et LANFRANCO ayant participé à l'étude. De même elle dévoilera les perspectives et suites actuelles données à ces travaux.



## Thermal ageing of electronic component solder joints for space applications

Vincent Voet<sup>1,2</sup>, Frederik Van Loock<sup>1</sup>, Christophe De Fruytier<sup>2</sup>, Aude Simar<sup>1</sup>, Thomas Pardoën<sup>1</sup>

1. Institute of Mechanics, Materials and Civil Engineering (iMMC), UCLouvain, Place Sainte Barbe 2, Louvain-la-Neuve 1348, Belgium

2. Thales Alenia Space Belgium, Rue Chapelle Beaussart 101, Mont-sur-Marchienne 6032, Belgium

**KEYWORDS** : Solder joint, Cohesive zone, Thermal ageing, Electronics, Space applications

### INTRODUCTION

Electronic assemblies used for space applications must fulfill high-end standards in terms of quality and reliability. These assemblies, made of components soldered on printed circuit boards (PCBs), are exposed to thermal cycling due to the satellite's orbit around the Earth and/or due to interrupted operating modes. Mismatches in the coefficients of thermal expansion of the assembly's materials, i.e. components, solder joints and PCBs, lead to cyclic deformation and fatigue damage within the joint [1,2,3]. This behavior is governed by the elasto-viscoplastic response [4,5] of the low melting temperature (tin-lead) solder alloys under typical satellite operation conditions and the damage resistance of the material and interfaces.

### AIM OF THE STUDY

The aim of the present study is to estimate the probability of failure of component assemblies comprising solder joints. Many factors may impact the solder joint lifetime. This includes the mounting process, the component size and geometry, the thickness or stand-off height of the solder layer between the component and the PCB, and the width/length of the copper footprint on the PCB.

### PRESENT WORK

Here, we focus on leadless surface mounted resistor solders joints (see Fig. 1). Preliminary experiments have shown that these joints are prone to premature crack initiation and growth within the solder layer during thermal cycling. Finite element (FE) simulations making use of a temperature-dependent elasto-viscoplastic constitutive model for the solder material are conducted in the Abaqus FE software package. Crack initiation and propagation is modelled via cohesive elements located at the

interface between the component and the joint. Experimental data have shown that failure usually occurs close to this interface. We analyse the dependence of the predicted number of thermal cycles for crack nucleation and the predicted crack propagation rate upon key model parameters. These parameters include the elasto-viscoplastic constitutive properties of the solder, the mismatch in the coefficients of thermal expansion, the geometry of the assembly (e.g. the component and the joint), and the thermal cycling profile.

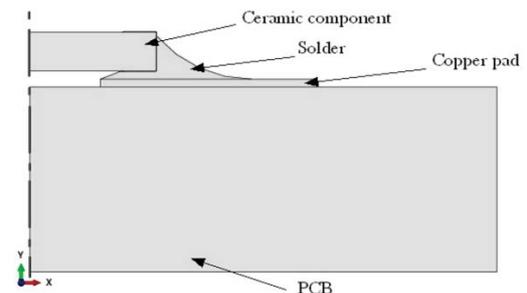


Figure 1: Electronic assembly of a chip resistor.

### References

- [1] Subrahmanyam, R., Wilcox, J. R., & Li, C.-Y. (1989). *A damage integral approach to thermal fatigue of solder joints*. IEEE, 12(4), 480–491.
- [2] Pang, J. H., Chong, D. Y. R., & Low, T. H. (2001). *Thermal cycling analysis of flip-chip solder joint reliability*. IEEE, 24(4), 705–712.
- [3] Zhang, L., Sun, L., Guo, Y., & He, C. (2014). *Reliability of lead-free solder joints in CSP device under thermal cycling*. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 25(3), 1209–1213.
- [4] Cheng, Z. N., Wang, G. Z., Chen, L., Wilde, J., & Becker, K. (2000). *Viscoplastic Anand model for solder alloys and its application*. Soldering & Surface Mount Technology.
- [5] Darveaux, R. (2000). *Effect of simulation methodology on solder joint crack growth correlation*. In 2000 Proceedings. 50th Electronic components and technology conference. IEEE, 1048–1058.



---

## **Fragilisation par l'H d'assemblages mécaniques.**

### **Un problème de longue date encore mal compris...**

Alexandre FLEURENTIN (Métallo Corner Conseils)

Souvent lorsqu'une vis zinguée se rompt en faisant apparaître un faciès intergranulaire contenant des « cavités sphériques », on a vite tendance à conclure à un problème de fragilisation par l'hydrogène (FPH) et à rechercher la teneur limite que peut emmagasiner cette pièce revêtue avant de se fragiliser...

Cette interrogation est le premier signe d'une méconnaissance du phénomène associé à la rupture brutale catastrophique qui nous intéresse. En effet, la quantification de la teneur totale en hydrogène à l'aide d'un spectromètre à désorption thermique (TDS) ne permet en aucun cas d'apporter une information pertinente pour trancher sur l'origine du litige.

Pour avoir une meilleure idée de ce qui peut entraîner une rupture par FPH, il va être intéressant de se poser d'autres questions que nous nous proposons de développer au cours de cette présentation :

- Quels sont les premiers signaux annonciateurs d'une FPH ?
- Existe-t-il un type d'hydrogène plus problématique que les autres ?
- Les aciers de construction sont-ils tous égaux face à la FPH ?
- Pourquoi le traitement de « dégazage » permet-il de rendre moins fragile la pièce revêtue ?

L'ensemble de ces questions nous permettront d'introduire les concepts associés à la répartition de l'hydrogène et de l'évolution de cette répartition au cours des différentes étapes de la gamme de fabrication et de l'utilisation du produit revêtu.

Cette approche associée à l'impact de l'hydrogène sur les pièces revêtues par voie électrolytique peut être étendue à l'ensemble des difficultés que peuvent rencontrer des aciers travaillant sous hydrogène : corrosion sous contrainte, travail en milieu H<sub>2</sub>S, fragilisation à froid en soudage, phénomènes de corrosion (piques, ..), difficulté liée à une protection galvanique, travail en environnement hydrogéné sous pression (fatigue, fluage), ...



## Vis intelligentes pour assemblages connectés

### A. Jean-Philippe GODIN<sup>1</sup>, B. Hugo FOURCADE<sup>1</sup>

1. Texys Group – Optel-Texys
2. Texys Group – Texense

**MOTS CLES :** vis instrumentée ; effort de serrage ; boulon connecté ; monitoring assemblage

### INTRODUCTION

Dans le contexte des objets connectés qui passent un nouveau cap avec l'industrie 4.0, l'instrumentation tient toujours un rôle majeur. En lien direct avec les machines ou leur environnement proche, les capteurs permettent un suivi du fonctionnement et des conditions externes afin d'optimiser et de pérenniser l'outil de production.

Sur les assemblages boulonnés, les moyens de serrage viennent installer la précharge préconisée et les vis instrumentées et connectées assurent le suivi en service. Celles-ci ne sont plus uniquement réservées aux étapes de qualification mais trouvent également leur place parmi les applications de contrôle et de monitoring.

### TECHNOLOGIE DE MESURE DES EFFORTS

TEXYS Group, spécialiste des capteurs embarqués soumis à des environnements contraints, propose une technologie innovante et brevetée : une conception spécifique de jauges de contraintes associée à leur installation dans la tête des boulons.



Figure 1 : Vis instrumentée TM-FAST-TH

L'intérêt principal est de ne pas modifier les caractéristiques mécaniques de la vis tout en permettant un accès pratique et direct à la mesure. Cette solution est validée sur des pièces de diamètre M4 à M27 et fournit des résultats précis : 1% de la pleine échelle.

### LES SOLUTIONS IN-SITU

Pour intégrer aisément les objets connectés dans le processus industriel, cette instrumentation ne serait rien sans les autres briques technologiques que sont la communication filaire et sans fil via des protocoles ouverts ou propriétaires et une IHM adaptée.



Figure 2 : Solution NFC

TEXYS Group est donc en mesure d'offrir un produit complet aux opérateurs de maintenance sur site comme aux gestionnaires de parc machines à distance, avec un même niveau de qualité sur les données de mesures fournies.

### CONCLUSION

L'industrie mécanique s'appuie principalement sur des outils de serrage au couple, connectés ou non, car ils répondent à la plupart des besoins. Ensuite, l'accès à une information de contrôle en continu de la tension d'assemblage avec une instrumentation dédiée devient nécessaire pour assurer le maintien en conditions opérationnelles des assemblages boulonnés sur les moyens de production sensibles.

### Références



## Bonding polymer composites with PEI film: crack trapping and enhanced fracture resistance

C. van Innis<sup>1</sup>, W. Ballout<sup>2</sup>, C. Bailly<sup>2</sup>, T. Pardoën<sup>1</sup>

1. Institute of Mechanics, Materials and Civil engineering (iMMC), UCLouvain, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgium

2. Institute of Condensed Matter and Nanosciences (IMCN), UCLouvain, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgium

**KEYWORDS:** Composite bonding, fracture toughness, adhesives

### INTRODUCTION

Fiber reinforced polymer (FRP) composites offer many advantages such as lightweight and high strength explaining their intensive use in aircrafts. However, the manufacturing of complex composite parts often requires bonding parts in an efficient way [1]. Adhesives can be used, but are limited to low to moderate toughness [2] and difficulties to develop integrated manufacturing approaches. Several strategies have been proposed to increase the joint toughness. One option is replacing the adhesive by a thermoplastic film, but this requires a tough thermoplastic-thermoset interphase.

Recently, Voleppe et al. observed an enhanced fracture resistance of thermoplastic/thermoset interfaces owing to a crack trapping mechanism in a morphological gradient when inserting a PEI film in the epoxy resin RTM6 [3]. The interface is characterized by a fracture toughness equal to 800J/m<sup>2</sup>, similar to that of good structural adhesives for composite bonding, while the one of the neat epoxy resin is only about 100 J/m<sup>2</sup>. The crack is trapped between the PEI film and a co-continuous morphology (Figure 1). The goal of the current research is to apply this concept to composite bonding and to better understand this toughening mechanism.

### JOINING COMPOSITES WITH PEI FILM

FRP composites are joined together during the curing process in a Resin Transfer Molding (RTM) press by inserting a PEI film in the middle of the plate. The co-curing of the composite parts and PEI creates the right morphology gradient enabling the crack trapping. Double cantilever beam (DCB) specimens are manufactured from the composite plate.

The DCB specimens are tested according to the ISO 25217 standard to evaluate the fracture toughness of the manufactured joints. PEI films of different thicknesses are inserted in order to determine if the thickness influences the joint toughness as already reported for toughened epoxy adhesives [2].

### UNDERSTANDING THE ORIGIN OF ENHANCED FRACTURE RESISTANCE

In order to unravel the origin of the enhanced fracture resistance observed in [3], blends with different PEI weight percentage ranging from 0 to 20 % are manufactured. Compression, nanoindentation and single-edge-notch bend (SENB) tests are performed on these homogeneous blends. Nanoindentation mapping is also performed along the interphase created when inserting a PEI film in RTM6 to evaluate the local properties.

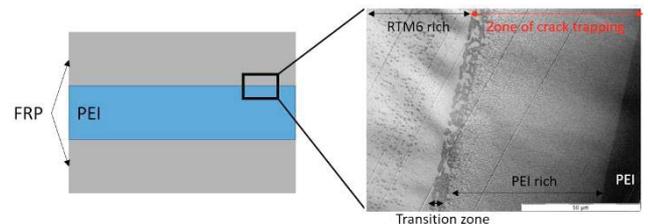


Figure 1: composites bonded with PEI and the gradient morphology observed at the PEI-FRP interface

### CONCLUSION

The enhanced fracture resistance observed for PEI-RTM6 interfaces is transferred to the joining of composites by inserting a PEI film between two composite parts during a co-curing step. The toughness of the joint is improved and is similar to that of structural adhesives for composite bonding.

### References

- [1] C. Zwebben (1981) « *Advanced composites for aerospace and future prospects* », Composites, **12**, pp. 235-240
- [2] P. Martiny et al. (2012) « *A multiscale parametric study of mode I fracture in metal-to-metal low-toughness adhesive joints* », Int J. Fract., **173**, pp. 105–133
- [3] Q. Voleppe et al. (2021) « *Enhanced fracture resistance of thermoset/thermoplastic interfaces through crack trapping in a morphology gradient* », Polymer, **218**



## Fretting fatigue of shrink fitted assembly under rotating bending loading: a numerical and experimental study to compare Crossland fatigue stress analysis and Ruiz contact stress approach.

B. Dieu<sup>1,2</sup>, S. Fouvry<sup>2</sup>, F. Bridier<sup>3</sup> et C. Ménard<sup>3</sup>

1. Laboratory of Tribology and Systems Dynamics (LTDS), École Centrale de Lyon, France.

2. Laboratory of Solid Mechanics (LMS), École Polytechnique, France.

3. Naval Group, France.

**KEYWORDS:** fretting-fatigue, shrink-fitted assemblies, rotating bending

### INTRODUCTION

Shrink-fitted assemblies are used in industrial applications to join sleeves and shafts or axles, where they are submitted to a complex multiaxial loading including bending, compression and torsion. In this configuration of large conform contact, fretting fatigue damage between the two parts may occur and lead to cracking. The aim of this research is to determine the best method among Crossland fatigue stress analysis and Ruiz contact stress approach to predict such damage through the influence of the interference size and the sleeve edges fillet geometry conducting experiments on samples and a 3D FEA.

### METHODS

Considering the complexity of the industrial case conditions, a simplified loading case is being investigated on a steel shaft and a shrink-fitted bronze sleeve, with two different outer sleeve geometries.

Rotating bending tests are conducted on a dedicated bench to assess the type of damage along with the lifespan of the shaft specimen. Experiments are carried out until partial failure, characterized by a stiffness drop during the test. The specimen is then studied using interference profilometry and Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX) techniques.

Tests are modelled using a full scale 3D FEA. Both fitting and bending are taken into account, as well as friction at the interface, granting access to contact data including slip and surface shear. Both Crossland (extensively applied criterion for multiaxial fatigue damage analysis) and surface stress Ruiz approach [1] (dedicated for tribological damage analysis) are investigated. These two approaches are first calibrated using a restricted number of rotating bending tests. Then they are compared to another set of loading conditions to evaluate their capacity to predict the fretting fatigue damages.

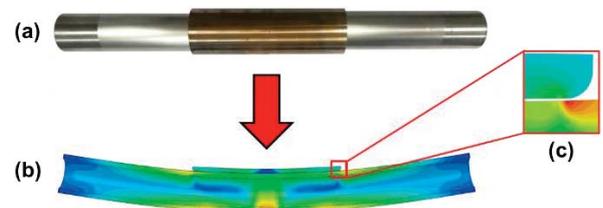


Figure 1: a) rotational bending sample; b) deformed shape of the sample and Von Mises equivalent stress distribution; c) detail of the sleeve edge with its fillet.

### RESULTS AND CONCLUSION

The two criteria fail to predict the crack nucleation locations. In addition, the Crossland analysis, which consists in comparing an equivalent fatigue stress to the alternated shear fatigue limit, tends to underestimate the cracking risk. Thus, non-local methods [2] (critical volume and length) are applied to better predict nucleation, showing improved results.

A parametric study is eventually conducted using modified numerical models and new tests, addressing the interference size and the geometry of the sleeve edges filets effects.

This study constitutes a first step towards a quantitative and reliable design method for shrink-fitted assemblies under highly multiaxial loadings.

### Références

- [1] K. Anandavel, R.V. Prakash (2013) «Extension of Ruiz Criterion for Evaluation of 3-D Fretting Fatigue Damage Parameter», *Procedia Engineering* 55, pp. 655-660.
- [2] S. Fouvry, H. Gallien, B. Berthel (2014) « From uni- to multi-axial fretting-fatigue crack prediction: development of a stress-gradient-dependent critical distance approach », *International Journal of Fatigue*, 62, pp. 194-209



## Optimisation de la conception des assemblages soudés par les réseaux de neurones

R. Ben Khalifa<sup>1</sup>, N. Chroud<sup>1</sup>, et N. Ben Yahia<sup>1</sup>

1. Laboratoire de mécanique, productique et énergétique, ENSIT, Tunis 5, av Taha Hussein 1008 Montfleury Tunis. Tunisie,  
[romdhane.benkhalifa@hotmail.com](mailto:romdhane.benkhalifa@hotmail.com)

**MOTS CLES :** Assemblage soudé, Joint de soudure, réseau de neurones.

### INTRODUCTION

Les industries de tous secteurs utilisent les procédés de soudage pour leurs assemblages métalliques. Les techniques et le matériel se perfectionnent d'année en année pour toujours plus d'efficacité. Malgré le développement de ce procédé d'assemblage, la préparation qui est l'étape préalable au soudage reste bien souvent réalisée avec des techniques non adaptées. Ce qui implique plusieurs types de défauts de soudure. Dans ce papier on a élaboré un système intelligent, basé sur les réseaux de neurones, permettant l'optimisation de la conception des joints de soudure, en intégrant les exigences liées à leur réalisation et à leur comportement en service. En effet, la première partie de ce papier est consacrée à la modélisation et l'identification des entités de préparation de soudage, ainsi que dans la deuxième partie, une élaboration d'un système neuronal pour l'identification et la sélection du joint de soudure optimal pour l'assemblage soudé proposé.

### MODELISATION DES ENTITES DE PREPARATION

L'entité de préparation est une forme géométrique qui limite l'espace à remplir de métal déposé, situé entre les deux éléments à souder dont les bords sont convenablement, préparés à cet effet. Il permet de réaliser le profil géométrique à donner au joint afin de permettre l'exécution d'une soudure.

L'entité de préparation comporte d'une part, la préparation des bords qui consiste à donner à ceux-ci un contour géométrique convenable, et d'autre part la préparation du joint obtenue par présentation des bords l'un par rapport à l'autre (écartement, alignement etc.).[1]

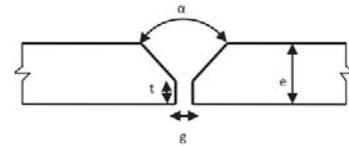


Figure 1: Entité de préparation en V.

### ELABORATION D'UN SYSTEME NEURONAL

Les réseaux de neurones, communément appelés des réseaux de neurones artificiels sont des imitations simples des fonctions d'un neurone dans le cerveau humain pour résoudre des problématiques d'apprentissage de la machine (Machine Learning).

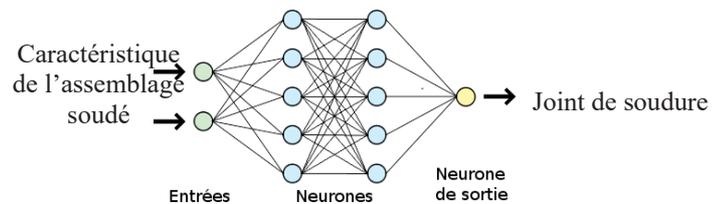


Figure 2 : structure du réseau de neurones

### CONCLUSION

À la suite d'une série d'apprentissage du réseau de neurone, on a fixé la structure optimale permettant de prédire le joint de soudure le plus performant, qui permet d'avoir un assemblage soudé optimal

### Références

- [1] H. Wang, B. Zhang, H. Qian, J. Liu, B. An, et F. Fan, « Experimental and numerical studies of a new prefabricated steel frame joint without field-welding: Design and static performance », *Thin-Walled Struct.*, vol. 159, p. 107271, févr. 2021, doi: 10.1016/j.tws.2020.107271.



## Simulation numérique d'un procédé de sertissage à ski

O. Filali<sup>1</sup>, S. Thuillier<sup>1</sup>, S. Bech<sup>2</sup> et P. Beyet<sup>3</sup>

1. Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient, France

2. Stellantis, Centre technique Velizy

3. Stellantis, Pole Excelcar

**MOTS CLES :** Assemblage par déformation plastique, sertissage à ski, tôle métallique, simulation numérique

### INTRODUCTION

Parmi les technologies d'assemblage des ouvrants automobiles, le sertissage est le procédé le plus utilisé. Il consiste en l'assemblage de deux tôles nommées peau et doublure par déformation plastique [1]. Ce procédé a connu des évolutions majeures au cours de la dernière décennie, puisque que jusqu'à récemment, il était réalisé avec des outils spécifiques et coûteux en deux étapes, à savoir pré-sertissage puis sertissage, après celle de tombage, utilisant des lames. Depuis, ce procédé a progressivement été remplacé par un procédé plus flexible utilisant un ou des robots et des molettes de sertissage [2][3]. Dans le premier cas, tout le bord à sertir est déformé en même temps alors que pour le sertissage à molette, le pliage se fait progressivement le long du contour, mais toujours en deux étapes. L'avantage essentiel de cette seconde technique est sa flexibilité, son faible coût, mais sa cadence est plus faible que le procédé à lame. Dans ce contexte, une nouvelle technologie appelée sertissage à ski a été développée par PSA Automobiles SA [4], qui conjugue les avantages des deux techniques précédentes, à savoir une grande flexibilité et des cadences importantes.

### SERTISSAGE A SKI

Le principe du sertissage à ski est proche de celui du sertissage à molette, avec le contrôle d'un

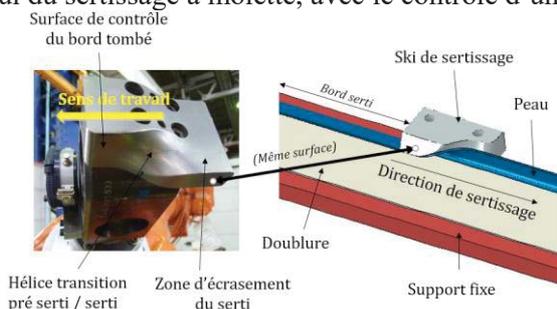


Figure 1 : Principe du sertissage à ski.

outil à surface hélicoïdale à l'aide d'un robot. La particularité de ce procédé est de combiner les étapes de pré-sertissage et de sertissage final en un seul passage comme le montre la figure 1.

### SIMULATION NUMERIQUE

Dans cette étude, un modèle éléments finis pour la simulation du sertissage à ski est proposé. L'objectif est d'analyser les états de contrainte et de déformation, les pressions de contact ainsi que les efforts de réactions sur l'outil de sertissage afin d'anticiper des défauts probables.

### CONCLUSION

Ce travail présente un nouveau procédé d'assemblage appelé sertissage à ski. Ce procédé permet d'avoir un compromis entre flexibilité et cadence. Un modèle élément finis a été proposé pour mieux comprendre les mécanismes de déformation de la tôle à l'aide de cet outil à géométrie complexe.

### Références

- [1] A. Muderrisoglu, M. Murata, M. A. Ahmetoglu, G. Kinzel, T. Altan (1996) « Bending, flanging, and hemming of aluminum sheet-an experimental study », Journal of Materials Processing Technology, volume 59, pp. 10-17.
- [2] N. Le Maoût, S. Thuillier, P. Y. Manach, (2010) « Classical and roll-hemming processes of pre-strained metallic sheets », Experimental mechanics, 50, pp. 1087-1097.
- [3] N. Le Maoût, S. Thuillier, P. Y. Manach (2010) « Drawing, flanging and hemming of metallic thin sheets: a multi-step process », Materials and Design, 31, pp. 2725-2736.
- [4] Brevet WO22017144791 "Blade and method for crimping metal sheets" 2017



