



SAINT-OUEN
6-7 JUILLET 2023

5^e Colloque **LES**
ASSEMBLAGES
MÉCANIQUES
Évolutions récentes et perspectives



Programme du 5^{ème} Colloque Assemblages Mécaniques

6-7 juillet 2023

Jeudi 06 Juillet

8h30 – 9h00 Accueil des participants

Conférences d'ouverture

09h00 – 09h45 Les challenges de l'assemblage dans l'industrie des lanceurs spatiaux
Michel LEROY ⁽¹⁾, Paul VAN DER SYTT ⁽¹⁾
(1) : ArianeGroup

Session 1 – Industrialisation des assemblages

09h45-10h10 Co-engineering efficace dans le respect des exigences 478979
Luc MOYART ⁽¹⁾
(1) : Fasteners Expert – Gris Découpage, Z.A. de La Louvière, 547000 Lesménils, France

10h10 - 10h35 Construction d'un critère de rupture prenant en compte la qualité des points soudés par résistance 473538
Nicolas LECONTE ^(1,2), Fahmi CHAARI ⁽¹⁾, Grégory HAUGOU ⁽¹⁾, Eric MARKIEWICZ ⁽¹⁾
(1) Univ. Polytechnique Hauts de France, CNRS UMR 8201 – LAMIH, F-5913 Valenciennes, France
(2) DMAS, ONERA, F-59014 Lille, France

10h35 - 10h40 Pitch exposant : Gris Group
Frédéric BELLO, Pierre MANGIN

10h35 - 10h40 Pitch exposant : DPS
Margot MANGIN

10h45 – 11h15 Café / Exposants

Session 2 – Assemblages multi-matériaux

11h15 – 11h40 Assemblage polymère-acier par assistance laser 473311
Elias AMRO ^(1,2), Afia KOUADRI-HENNI ^(1,2)
(1) : INSA de Rennes
(2) : ROMAS, Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes (LS2N), UMR CNRS 6004

11h40 – 12h05 Assemblage polymère-acier par rivetage auto-poinçonneur 473307
Elias AMRO ^(1,2), Afia KOUADRI-HENNI ^(1,2)
(1) : INSA de Rennes
(2) : ROMAS, Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes (LS2N), UMR CNRS 6004

12h05 – 12h30 Caractérisation et modélisation de la tenue d'un assemblage SPR composite/métallique 473534
Nicolas LECONTE ^(1,2), Benjamin BOUREL ⁽¹⁾, Franck LAURO ⁽¹⁾, Eric MARKIEWICZ ⁽¹⁾
(1) : Univ. Polytechnique Hauts de France, CNRS UMR 8201 – LAMIH, F5913 Valenciennes, France
(2) : DMAS, ONERA, F-59014 Lille, France

12h30 – 12h35 Pitch exposant: BUMAX
Camille FEUILLET

12h35 – 12h40 Pitch exposant: INTES
Laurent DASTUGUE

12h25 – 13h55 Déjeuner / exposition

Programme du 5^{ème} Colloque Assemblages Mécaniques

6-7 juillet 2023

Session 3 – Fiabilité et tenue en service

14h10 – 14h35 Vers la modélisation de gamme de serrage 355790

Zouhair CHAIB ⁽¹⁾, Christophe DELCHER ⁽¹⁾, Christian PALECZNY ⁽²⁾, Adeline HOUSSAYE ⁽²⁾

(1) CETIM Saint-Etienne, Pôle Ingénierie des Assemblages (IDA)

(2) Safran Aircraft Engines, Site de Villaroche, Direction Technique

14h35 – 15h00 Probabilistic tightening torque detection in bolted joint structures 479320

Rafael de O. TELOLI ⁽¹⁾, Gaël CHEVALLIER ⁽¹⁾

(1) CNRS, FEMTO-ST Institute, UFC/CNRS/ENSMM/UTBM, Department of Applied Mechanics

15h00 – 15h25 Démarche fiabilité prévisionnelle et assemblages mécaniques 479999

M. PONT ⁽¹⁾, M. BERANGER ⁽¹⁾, B HENOCQ ⁽¹⁾, G. MORIN ⁽¹⁾

(1) RENAULT, Technocentre, 1 avenue du golf, 78280 Guyancourt, France

15h25 – 15h50 Sophisticated bolt thread approach for bolt loosening analysis applied to industrial tasks 472952

Michael KLEIN ⁽¹⁾, Jacques MARCHESINI ⁽²⁾, Laurent DASTUGUE ⁽²⁾

(1) INTES GmbH, Stuttgart, Germany

(2) INTES France, Rambouillet, France

15h50 – 16h20 Café Poster/ exposition

Session 4 – Maîtrise des assemblages

16h20 – 16h45 Vers une maîtrise du serrage au couple grâce à un procédé d'assemblage innovant 478695

Adeline FAU ⁽¹⁾, Alain DAIDIE ⁽¹⁾, Elias DELSOL ⁽¹⁾

(1) Institut Clément Ader (ICA), Université de Toulouse, CNRS, IMT Mines Albi, INSA, ISAE-SUPAERO,

UPS, Toulouse, France

16h45 – 17h10 Simulation numérique du vieillissement des joints métalliques : influence de la température et des variations de pression 473236

Florent LEDRAPPIER ⁽¹⁾, Jean-François JULIAA ⁽¹⁾, Tony ZAOUTER ⁽²⁾, Patrice CHARVIN ⁽²⁾

(1) TECNETICS Group France, Laboratoire d'étanchéité Maestral, F-26700 Pierrelatte, France

(2) CEA, DES, ISEC, DPME, SEME, Laboratoire d'étanchéité Maestral, Univ. Montpellier, Marcoule, France

17h10-17h35 Flexible tolerancing powered by integrated simulation & co-design approaches 471615

Tanguy MORO ⁽¹⁾, Ramzi ASKRI ⁽¹⁾, Xavier DUGROS ⁽²⁾, F. CANDERATZ ⁽²⁾, Yann, CHAPELLE ⁽²⁾, Pierre Alain RANCE ⁽³⁾

(1) IRT Jules Verne

(2) Digital Product Simulation

(3) MECAMaster

19h00 – 23h00 Diner & Animations

Programme du 5^{ème} Colloque Assemblages Mécaniques

6-7 juillet 2023

Vendredi 07 Juillet

08h00 – 08h30 Accueil des participants

Conférence d'ouverture (2^{ème} jour)

08h30 – 9h15 Fixations et assemblages : Symbiose Recherche & Développement et normalisation

Joëlle PECHENARD ⁽¹⁾, Christophe DELCHER ⁽²⁾

(1) : ARTEMA, Organisation professionnelle des industriels de la Mécatronique (Groupe Fixations)

(2) : CETIM Saint-Etienne, Pôle Ingénierie des Assemblages (IDA)

Session 5 – Normes et impact environnemental

09h15-09h40 Méthodologie de choix raisonné d'une technologie d'assemblage 479230

Cyrille DALLA ZUANNA ⁽¹⁾

(1) : CETIM Saint-Etienne, Pôle Performance Industrielle Durable (PID)

09h40 – 10h05 Etude comparative de la résistance de tiges d'ancrages sollicitées en traction 472946

Romain PALACIOS ⁽¹⁾, Anthony RODIER ⁽¹⁾

(1) : CTICM

10h05 – 10h30 Evaluation de l'impact environnemental des vis 479254

Arnaud GIBERT ⁽¹⁾, Noémie BOUCHERIT ⁽²⁾, Marc GOMEZ ⁽¹⁾

(1) : CETIM Saint-Etienne, Pôle Performance Industrielle Durable (PID)

(2) : CETIM Nantes, Pôle Performance Industrielle Durable (PID)

10h30 – 11h00 Café / Exposants

Session 6 – Modélisation et dimensionnement : modèles de comportement

11h00 – 11h25 Modélisations des assemblages mécaniques des immeubles en bois de grande hauteur 473621

Dalmer GOMEZ ⁽¹⁾, Gwendal CUMUNEL ⁽¹⁾, Michel BORNERT ⁽¹⁾, Nicolas PEYRET ⁽²⁾, Thomas CATTEROU ⁽³⁾

(1) Navier, Ecoles des Ponts, Université Gustave Eiffel, CNRS, F-77455 Marne-la-Vallée, France

(2) : Laboratoire Quartz (EA 7393), ISAE-Supméca, 3 rue Fernand Hainaut, 93400 Saint Ouen, France

(3) : FCBA, Institut technologique du bois, Allée du Boutaut, 33000 Bordeaux, France

11h25 – 11h50 Nouvelle approche de distribution de la charge externe sur les fixations 478305

Zouhair CHAIB ⁽¹⁾, Christophe DELCHER ⁽¹⁾

(1) CETIM Saint-Etienne, Pôle Ingénierie des Assemblages (IDA)

11h50 – 12h15 Numerical modeling of plastic deformation assembly methods 471477

Nadine EL KOSSEIFI ⁽¹⁾, Patrice LASNE ⁽¹⁾, Etienne PERCHAT ⁽¹⁾, Max BINAGOT ⁽¹⁾

(1) TRANSVALOR S.A., 950 avenue Roumanille, CS 40237 Biot, 06904 Sophia Antipolis – Cedex, France

12h15 – 13h45 Déjeuner / exposition

Programme du 5^{ème} Colloque Assemblages Mécaniques

6-7 juillet 2023

Session 7 – Modélisation et dimensionnement : assemblages composites

13h45 – 14h10 Dimensionnement simplifié de réparations composites collées en stepping : une étude comparative de modèles semi-analytiques et numériques. 475027

Jean-Baptiste ORSATELLI ^(1,2), Eric PAROISSIEN ⁽²⁾, Frédéric LACHAUD ⁽²⁾, Sébastien SCHWARTZ ⁽²⁾

(1) DGA Techniques Aéronautiques, 47 rue Saint-Jean, CS 93123 31131 Balma Cedex, France

(2) Institut Clément Ader (ICA), Université de Toulouse, ISAE-SUPAERO, INSA, IMT MINES ALBI, UTIII, CNRS, 3 rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse, France

14h10 – 14h35 Modelling of adhesive failure for crash 473528

Benjamin BOUREL ⁽¹⁾, Franck LAURO ⁽¹⁾, Grégory HAUGOU ⁽¹⁾, NICOLAS LECONTE ^(1,2)

(1) : Univ. Polytechnique Hauts de France, CNRS, UMR 8201 – LAMIH, F-59313 Valenciennes, France

(2) : DMAS, ONERA, F-59014 Lille, France

14h35 – 15h05 Café / Exposants

Session 8 – Modélisation et dimensionnement : modèles simplifiés

15h05 – 15h30 Bolt Sim: Idéalisation des assemblages boulonnés précontraints 477930

Jean ABRY ⁽¹⁾, Alexandre COLLIN ⁽¹⁾, Thomas KUNTZ ⁽¹⁾, Christophe MITTELHAEUSER ⁽¹⁾,
Maria SHEVTSOVA ⁽¹⁾, Didier TURLIER ⁽¹⁾

(1) LOHR Industrie

15h30 – 15h55 Elaboration d'un modèle de connecteur pour la simulation dynamique d'assemblages boulonnés 473642

Quentin LANÇON ⁽¹⁾, Pierre-Alain GUIDAULT ⁽¹⁾, Pierre-Alain BOUCARD ⁽¹⁾, Nicolas VALLINO ⁽²⁾

(1) Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS – Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190 Gif-sur-Yvette, France

(2) Safran Tech, Digital Sciences & Technologies Department, rue des jeunes bois, Chateaufort, 78114 Magny-les-Hameaux, France

16h00 Clôture du Colloque Assemblages Mécaniques 2023

SESSION 1: INDUSTRIALISATION DES ASSEMBLAGES

CO-ENGINEERING EFFICACE DANS LE RESPECT DES EXIGENCES

Luc Moyart ⁽¹⁾

(1) Fasteners Expert - Gris Découpage, Z.A. de La Louvière, 54700 Lesménils, France

INTRODUCTION

Parmi le nombre important de requis et d'exigences exportées d'un cahier des charges, lors de la réponse d'une offre, le constructeur doit identifier, répertorier et classer tous les besoins des produits disponibles et indisponibles du marché.

Concernant les produits indisponibles, il est impératif d'intégrer le plus en amont possible dans le planning de développement les notions de coûts, de délais et de qualité proposés par les fournisseurs pour la fabrication de nouveaux produits.

Il prend en compte les phases de recherche et développement, d'industrialisation, de mise au point ainsi que tous les essais associés qui permettront de répondre avec justesse et rigueur aux demandes du client final et d'être conforme au cahier des charges initial.

Dans l'étude de cas présentée, nous avons plusieurs contraintes et objectifs à respecter, à savoir :

- Respecter les caractéristiques du client et être force de proposition dans l'innovation,
- Travailler en partenariat avec plusieurs entités,
- Utiliser un produit prémonté afin de limiter les erreurs de montage,
- Limiter le nombre de composants,
- Réduire le temps méthode,
- Maitriser la maintenance sur le produit final durant toute la durée de vie de l'équipement,
- Respecter le planning de développement,
- Proposer un produit à coût objectif en prenant en compte l'ensemble des éléments constitutifs.

La volonté et l'agilité des entreprises ont permis très facilement de travailler en étroite collaboration afin de proposer une solution adaptée et complètement intégrée.

La présence du client, la SNCF dans notre cas, a permis dès le départ de les informer sur nos investigations et réflexions dans le déploiement d'un nouveau concept entrant dans la composition de l'équipement.

Fort du travail collaboratif que nous menons depuis de nombreuses années avec les experts du Groupe de Travail Visserie Ferroviaire, en partant de ce modèle, nous avons réunis le client, des concepteurs (constructeur et partenaires), des experts ainsi que la maintenance du client pour étudier une conception robuste et proposer un produit qui répond à tous les sujets évoqués.

En partant d'un produit éprouvé et reconnu de la société Gris Découpage, nous avons intégré une rondelle TREP[®] 3 éléments dans une nouvelle solution de fixation pour le milieu complexe et exigeant de l'électromobilité.

Ce nouveau produit développé pour le cas d'emploi de la fixation des cellules des "Pack-Battery" est en cours d'industrialisation et sera décliné dans une large gamme dimensionnelle.

A terme, ce produit sera utilisé par d'autres entreprises dans d'autres domaines d'activités.

Dans ce contexte, une conception gérée par une équipe pluridisciplinaire a permis de lancer la production de pièces et d'alimenter nos fabricants de batteries dans les délais impartis.

CONSTRUCTION D'UN CRITERE DE RUPTURE PRENANT EN COMPTE LA QUALITE DES POINTS SOUDES PAR RESISTANCE

N. Leconte^{1,2}, F. Chaari¹, G. Haugou¹, E. Markiewicz¹

1. Univ. Polytechnique Hauts-de-France, CNRS, UMR 8201 - LAMIH, F-59313 Valenciennes, France

2. DMAS, ONERA, F-59014 Lille, France

MOTS CLES : Resistance Spot Welding, Non Destructive Testing, Failure

INTRODUCTION

Les véhicules actuels peuvent comporter des milliers de points soudés. Leur qualité est contrôlée sur la chaîne de fabrication. Différentes qualités peuvent être relevées telles que collé, conforme ou étincelé. Cependant les modèles de simulation numérique des structures automobiles soumises au choc et à l'impact ne prennent en compte qu'une qualité « nominale », i.e. identique pour tous les points soudés dans les simulations numériques [1, 2].

Pour améliorer la prédictivité des simulations numériques, et en particulier les corrélations essais-calculs, il s'agirait donc de pouvoir personnaliser la qualité des points soudés dans les calculs de structures soumises au choc et à l'impact, en particulier pour les points de contrôle.

L'idée a donc été d'évaluer la qualité des points soudés via des moyens de contrôle non-destructif avant de procéder à des essais destructifs en modes purs et mixtes I/II de type Arcan.

Les essais ont été effectués pour 2 vitesses de sollicitation (0.001m/s ; 0.1m/s) et pour 3 qualités de points soudés. Une répétitivité de 3 a été employée et 7 angles ont été considérés (0, 15, 30, 45, 60, 75, 90°) [3]. Ils ont notamment mis en évidence l'absence de sensibilité de l'effort maximum à la vitesse de sollicitation.

L'idée a alors été d'essayer de construire un critère de rupture en effort maximum pour des chargements purs et mixtes I/II prenant en compte la qualité des points soudés évaluée via les moyens CND.

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de construire un critère de rupture de ce type prenant en compte le diamètre du point soudé.

Ce type de critère pourra faire l'objet d'une intégration dans les simulations numériques de structures soudées par points soumises au choc et l'impact.

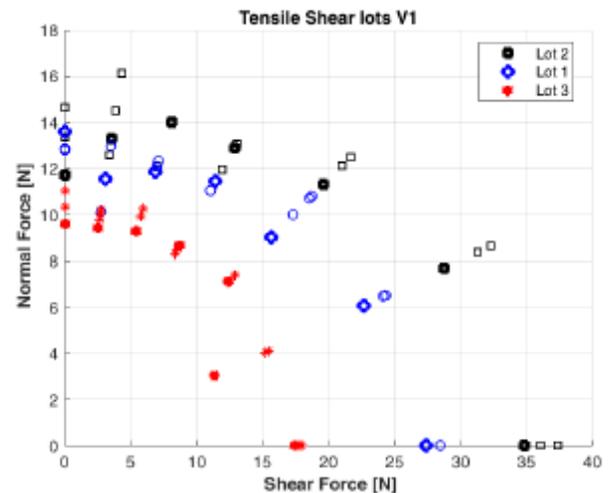


Figure 1: Efforts maximums en modes purs et mixtes pour différentes qualités de points soudés.

Références

- [1] R. Chtourou, N. Leconte, B. Zouari, F. Chaari, É. Markiewicz, B. Langrand (2017) *Macro-modeling of spot weld strength and failure: formulation and identification procedure based on pure and mixed modes of loading*, Engineering Computations, 34 (3), pp. 941-959.
- [2] R. Chtourou, N. Leconte, F. Chaari, É. Markiewicz, B. Zouari (2017). *Macro-modeling of the strength and failure of multi-layer multi-steel grade spot welds: Connector formulation, assembly model and identification procedure*, Thin-Walled Structures, 113, pp. 228-239.
- [3] R. Tounsi, G. Haugou, F. Chaari, N. Leconte, É. Markiewicz (2019). *Experimental characterization of the mechanical behaviour and the failure of multi-sheet and multi-material spot welded assembly*. International Journal of Impact Engineering, 130, pp. 226-238.

SESSION 2: ASSEMBLAGES MULTI-MATERIAUX

ASSEMBLAGE POLYMERE-ACIER PAR ASSISTANCE LASER

E. Amro^{1,2}, A. Kouadri-Henni^{1,2}

1. Institut National des Sciences Appliquées de Rennes (INSA de Rennes)

2. ROMAS, Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes (LS2N), UMR SCNR 6004

MOTS CLES : assemblage polymère-acier, assemblage intrinsèque, assistance Laser, mécanismes de rupture

INTRODUCTION

L'introduction de matériaux composites à base polymère dans les structures est de plus en plus répandue dans les industries automobile ou aéronautique en tant que levier important d'allègement. Cependant, l'association polymère-métal nécessite de revoir les techniques d'assemblages conventionnelles à cause de la nature hétérogène de l'assemblage des matériaux en question.

Dans la perspective de pouvoir exploiter au maximum le potentiel d'allègement par l'introduction de matériaux à base polymère et plus particulièrement les thermoplastiques, l'intérêt se porte aujourd'hui sur des techniques permettant de réaliser un assemblage dit "intrinsèque", c.-à-d. permettant de réaliser la jonction polymère-métal sans ajout de matière ni éléments extérieurs. C'est là que les procédés Laser sont de plus en plus mis en avant car leur polyvalence permet de réaliser à la fois la préparation de surface nécessaire sur le métal mais également l'opération de soudage sur le principe de la conduction thermique.

MODE D'ASSEMBLAGE POLYMERE-ACIER PAR ASSISTANCE LASER

Le mode d'assemblage PA6-acier par assistance Laser est réalisé par l'intermédiaire des cavités créées via le Laser à la surface du substrat métallique. Comme on le voit sur la Figure 1, le mode d'assemblage se fait par macro-micro ancrages mécaniques, l'utilisation d'une source Laser pulsée étant dans ce sens avantageux. On peut noter que l'intégralité de l'interface d'assemblage participe à l'ancrage mécanique et de ce fait favorise une excellente distribution des contraintes.

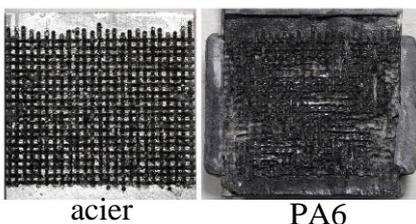


Figure 1: Ancre mécanique obtenu avec le traitement Laser entre l'acier et la résine PA6.

MECANISMES DE RUPTURE DES JOINTS ACIER/PA6 PAR ASSISTANCE LASER

La Figure 2 présente le faciès de rupture typique d'une éprouvette acier/PA6 après un chargement en traction-cisaillement. On observe que l'endommagement est circonscrit à une zone très restreinte, à savoir l'interface d'assemblage entre la résine PA6 et la surface traitée au Laser de l'acier. Hors de cette zone, les matériaux de base que sont l'acier et le PA6 ne sont pas concernés par la rupture de l'éprouvette. Comme on le voit sur l'agrandissement à droite de la Figure 2, le mode de rupture adhésif est très majoritaire puisqu'on retrouve à la surface de l'acier traité au Laser, les cavités en grand nombre sans traces de résine provenant du PA6. On peut néanmoins identifier quelques zones où le faciès de rupture s'apparente à un mode de type cohésif. On remarque que ce mode de rupture minoritaire ne fait pas intervenir les fibres longues qui renforcent la matrice PA6.

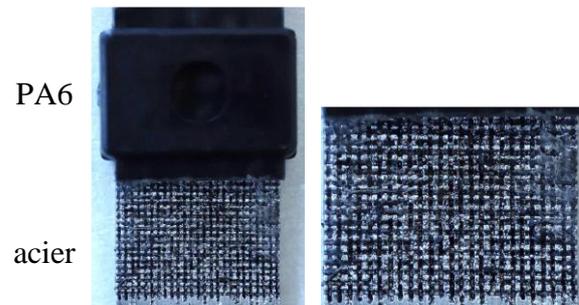


Figure 2: Faciès de rupture typique en traction-cisaillement pour une éprouvette acier/PA6 renforcé.

CONCLUSION

Appliqué à un couple PA6 renforcé fibres de verre tissées (3 mm) / acier HSLA380 (2 mm), l'assemblage par assistance Laser a permis d'obtenir une tenue mécanique de 19 MPa en traction-cisaillement. Un résultat cohérent avec la littérature. Le mode d'assemblage par micro-macro ancrages mécaniques fait intervenir un volume de matière restreint lors du chargement et se traduit par un mode de rupture majoritairement adhésif.

ASSEMBLAGE POLYMERE-ACIER PAR RIVETAGE AUTO-POINÇONNEUR

E. Amro^{1,2}, A. Kouadri-Henni^{1,2}

1. Institut National des Sciences Appliquées de Rennes (INSA de Rennes)

2. ROMAS, Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes (LS2N), UMR SCNR 6004

MOTS CLES : assemblage polymère-acier, rivetage auto-poinçonneur, mécanismes de rupture

INTRODUCTION

La poursuite des objectifs de réduction de la masse des véhicules produits dans l'industrie automobile entraînant l'utilisation de matériaux plus légers à base de polymères dans la fabrication des structures de rend critique la gestion des interfaces polymère-métal. Il a été démontré dans la littérature que pour la fabrication à grande échelle, le rivetage auto-perceur (SPR) représente une technique alternative fiable au soudage par résistance par points (RSW) conventionnel.

Dans cette étude, le comportement du matériau thermodurcissable SMC au cours du processus SPR a été étudié expérimentalement de même que l'influence de la vitesse de rivetage en tant que paramètre majeur du processus SPR sur l'endommagement de la couche composite. Finalement, les mécanismes de rupture du joint polymère-métal résultant de la rupture sous des chargements de traction-cisaillement et d'arrachement ont été étudiés.

ENDOMMAGEMENT LOCAL DU MATERIAU COMPOSITE LORS DE L'ASSEMBLAGE

L'influence du procédé de rivetage sur l'endommagement du matériau composite a été étudiée à l'échelle macroscopique avec la vitesse de rivetage comme variable. Dans les mesures effectuées, on peut voir qu'à mesure que la vitesse de rivetage augmente, le diamètre extérieur de la cavité, induite par la traversée du rivet, augmente également nettement. Cependant, cette hausse reste relativement faible puisque l'on constate une évolution du diamètre de 6,5 mm pour une vitesse de 20 mm/s à 7,22 mm à 100 mm/s ce qui représente +11,1%. L'augmentation mesurée du diamètre de la cavité suggère donc bien que le matériau composite SMC à l'étude est sensible à l'évolution de la vitesse de rivetage.

MECANISMES DE RUPTURE DES JOINTS RIVETES POLYMERE-METAL

En étudiant le profil de rupture typique du joint riveté SMC-acier, nous pouvons voir que sous

chargement arrachement, le mode de rupture du joint est caractéristique d'une déchirure de la couche supérieure. Lors du chargement progressif, la pression exercée par la tête du rivet sur les flancs de l'orifice augmente, forçant la cavité à s'élargir jusqu'au point où la tête du rivet a complètement traversé l'épaisseur de la couche composite. Dans ce mode de rupture, le détachement du composite se fait sans arrachement de matière. La rupture du composite est reconnaissable par les multiples fissures macroscopiques qui se propagent du bord de la cavité au reste de la pièce dans des directions orthogonales.

Dans le cas du chargement traction-cisaillement, on observe que la tête du rivet finit par pénétrer le matériau composite dans l'épaisseur et ce accompagné par un arrachement de matière, dès lors que la pression appliquée par le rivet ne peut plus être supportée par le polymère. Le mode de rupture s'apparente à un délaminage de la couche supérieure par compression. En parallèle, on constate un autre phénomène à savoir que le substrat composite produit un effet de levier sur le rivet et provoque son déchaussage partiel de la couche inférieure en acier. Une fois dans cette position, le rivet n'assure plus pleinement sa fonction mécanique et provoque une chute brutale de la résistance du joint.

CONCLUSION

Appliqué à un couple matériau composite SMC de 2.5 mm / acier HSLA380 de 1.3 mm, l'assemblage structurel polymère thermodurcissable-métal par rivetage auto-poinçonneur a montré une tenue mécanique de 41 MPa en traction-cisaillement et 36 MPa en arrachement.

Concernant la couche composite, les résultats ont montré que l'endommagement du matériau est sensible à l'évolution de la vitesse de rivetage mais dans proportions limitées, à savoir que le diamètre du trou s'écarte peu du diamètre de la tête du rivet.

Suivant la direction de sollicitation, le mode de rupture de l'assemblage évolue, à savoir une délamination du matériau composite en traction-cisaillement et rupture fragile par propagations de fissures en arrachement.

CARACTERISATION ET MODELISATION DE LA TENUE DYNAMIQUE D'UN ASSEMBLAGE SPR COMPOSITE / METALLIQUE

N. Leconte^{1,2}, B. Bourel¹, F. Lauro¹, E. Markiewicz¹

1. Univ. Polytechnique Hauts-de-France, CNRS, UMR 8201 - LAMIH, F-59313 Valenciennes, France

2. DMAS, ONERA, F-59014 Lille, France

MOTS CLES : Self Piercing Riveting, Connector element, Crash/Impact

INTRODUCTION

La technique du rivetage auto-poinçonneur est de plus en plus utilisée dans l'industrie automobile pour sa capacité à connecter différents matériaux dans une optique de réduction de masse. La tenue de tels assemblages multi-matériaux doit être caractérisée et modélisée dans les calculs de structures complètes.

Des essais Arcan sont réalisés afin de caractériser un assemblage aluminium/PA66 de deux tôles en traction, cisaillement et de manière mixte. L'évolution de l'effort maximum et de l'énergie dissipée en fonction de l'angle et de la vitesse de chargement est évaluée. Les modes de rupture de l'assemblage aluminium – PA66 sont également comparés à ceux des assemblages métalliques.

Des expériences sont également réalisées sur des sous-structures comprenant de nombreuses connections et pour deux vitesses de chargement: 5mm/s et 1500 mm/s. L'évolution de l'effort maximum et de l'énergie dissipée est évaluée. Le chargement local subi par une connexion est également vérifié.

La modélisation des assemblages dans les calculs de structures soumises au choc et à l'impact s'avère en général délicate, car il s'agit de capturer le comportement de la liaison sans la modéliser finement, car cela impliquerait des coûts trop conséquents dans les calculs explicites.

C'est la raison pour laquelle des modèles de type contrainte cinématique ou élément connecteur sont en général employés pour modéliser les assemblages ponctuels [1-2].

Un modèle de connecteur est proposé pour l'assemblage SPR 2 tôles aluminium/PA66 [3]. Les paramètres sont identifiés sur la base des essais Arcan et validés sur les essais sur sous-structure (Figure 1). Les comparaisons indiquent un accord satisfaisant entre les prédictions numériques et les essais.



Figure 1: Contact bille sur plan.

Références

- [1] R. Chtourou, N. Leconte, B. Zouari, F. Chaari, É. Markiewicz, B. Langrand (2017) *Macro-modeling of spot weld strength and failure: formulation and identification procedure based on pure and mixed modes of loading*, Engineering Computations, 34 (3), pp. 941-959.
- [2] R. Chtourou, N. Leconte, F. Chaari, É. Markiewicz, B. Zouari (2017). *Macro-modeling of the strength and failure of multi-layer multi-steel grade spot welds: Connector formulation, assembly model and identification procedure*, Thin-Walled Structures, 113, pp. 228-239.
- [3] N. Leconte, B. Bourel, F. Lauro, C. Badulescu, É. Markiewicz (2020). *Strength and failure of an aluminum/PA66 self-piercing riveted assembly at low and moderate loading rates: experiments and modeling*, International Journal of Impact Engineering 142 103587.

SESSION 3: FIABILITE ET TENUE EN SERVICE

Vers la modélisation de gamme de serrage

Z. Chaib¹, C. Delcher¹, C. Paleczny² et A. Houssaye²

1. CETIM Saint-Etienne Pôle Ingénierie Des Assemblages (IDA)
2. Safran Aircraft Engines, Site de Villaroche, Direction Technique

MOTS CLES : Modélisation, gamme de serrage

INTRODUCTION

Le choix des gammes de serrage dans l'industrie repose le plus souvent sur l'expérience de chaque entreprise et sur des règles génériques empiriques (maîtrise du placage, serrage en croix, mise en tension progressive, etc.).

Sur certains assemblages complexes, il a été constaté que la gamme de serrage avait un impact non négligeable sur la qualité de serrage.

L'optimisation de la gamme peut être réalisée par la voie expérimentale mais cette étape est chronophage. Afin de réduire la durée d'optimisation de gamme, des simulations ont été évaluées. La présentation proposée présente la démarche générique initiée sur un assemblage utilisé dans un turboréacteur.

MODELISATION DE GAMME DE SERRAGE

L'assemblage qui sert de support à la présentation de l'approche proposée comporte des composants axisymétriques fixés par des rangées de N boulons. Cet assemblage présente la particularité de comporter des vis ajustées et des pièces dont le positionnement a un impact sur l'efficacité de serrage. Sur ce type d'assemblage, des gammes de serrage trop simples peuvent conduire à des dispersions de serrage importantes et il est souvent nécessaire de procéder à des séquences de serrage par paliers multiples.

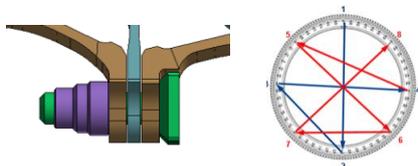


Figure 1: Exemple de liaison étudiée et de séquence initiale de serrage.

La modélisation proposée est fondée sur une modélisation éléments finis d'un secteur représentatif de la liaison étudiée. Afin de réduire les temps de calcul, il a été décidé d'utiliser les symétries de l'assemblage et des séquences de serrage. Les points clés du modèle sont la prise en compte de toutes les zones de contact de l'assemblage, de la prise en compte des frottements associés et de l'historique des

efforts de serrage appliqués sur chacune des vis. La présentation proposée illustrera les étapes majeures de modélisation appliquées à des gammes différentes et donnera quelques éléments de validation.

EXEMPLES DE RESULTATS

Les modèles proposés permettent de tracer l'évolution des efforts pour chaque vis en fonction de l'avancée des séquences mais aussi de quantifier l'évolution de la flexion ou des pressions de contact dans les zones d'intérêt.

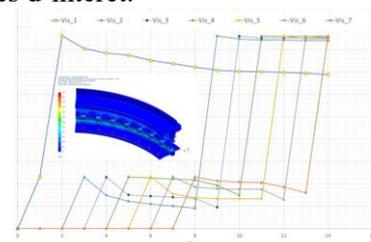


Figure 1: Exemple de post-traitement des efforts de serrage en fonction de l'évolution des séquences.

En utilisant la même méthode de modélisation pour des séquences différentes, il est possible de comparer l'efficacité des gammes en se fixant des critères (dispersions des efforts, relâchement des efforts, pression de contact dans les pièces assemblées).

CONCLUSION

Les résultats initiaux proposés permettent d'envisager plusieurs applications:

- Amélioration de gamme de serrage afin de réduire les dispersions liées aux interactions et relâchement entre vis,
- Etude d'impact de changement de la définition de composant.

Parmi les axes d'amélioration de modélisation figurent les points suivants :

- Poursuite des études en étudiant différentes stratégies de réduction de modèle afin d'envisager des modèles 360°,
- Amélioration de la convergence et la robustesse des modèles.

PROBABILISTIC TIGHTENING TORQUE DETECTION IN BOLTED JOINT STRUCTURES

Rafael de O. Teloli¹, Gaël Chevallier¹

1. CNRS, FEMTO-ST, FEMTO-ST Institute, UFC/CNRS/ENSM/UTBM, Department of Applied Mechanics

KEYWORDS : Bolted joints, Tightening torque, Probabilistic machine learning.

INTRODUCTION

Bolted joints are commonly used in industry due to their safety and ability to create complex modular systems. However, they can be damaged by cracks or vibrations, which has led to the development of methods for monitoring their health. These methods can be divided into direct, sensor-based approaches and indirect methods using piezoelectric sensors or vibration-based data. However, they have limitations, such as fluctuations and difficulties inspecting submerged or complex regions. To address these challenges, this paper proposes an integrated approach that uses machine learning to detect changes in modal parameters, providing a clear indicator of damage severity without requiring direct torque measurements. This approach is intended to support stochastic structural health monitoring strategies.

METHODOLOGY

This methodology employs the Gaussian Mixture Model (GMM) for damage detection and Gaussian Process Regression (GPR) for quantifying the tightening torque in bolted joints. To extract features, vibration data is obtained from a set of beam assemblies in a healthy state, and sensitive natural frequencies are used to calculate the damage index. The GMM procedure is then used to organize the probability distributions of the healthy state clusters and define a threshold value. Structural condition detection is performed using blind tests with unknown torque conditions. The GPR is used to learn the nonlinear relationship between the damage index and tightening torque level and is trained with half of the available data set. Finally, the GPR-based model is used to determine the mean and variance of the tightening torque, with torque uncertainty estimates inferred from a simple damage index.

RESULTS

Figure 1(a) presents the experimental setup, the so-called Orion beam. To simulate the gradual loss of torque in bolted joints, the structure is subjected to varying levels of torque, ranging from 80 cNm to 5 cNm with a decrement of 5 cNm. However, to maintain gradual changes in the system dynamics and avoid abrupt changes in structural stiffness, the central bolt is kept fully tightened with a torque of 80 cNm at all experimental measurements. The torque range

between 80 cNm to 60 cNm is considered a safe/healthy condition, while torque levels between 55 cNm to 5 cNm indicate a damaged condition due to loss of connecting properties.

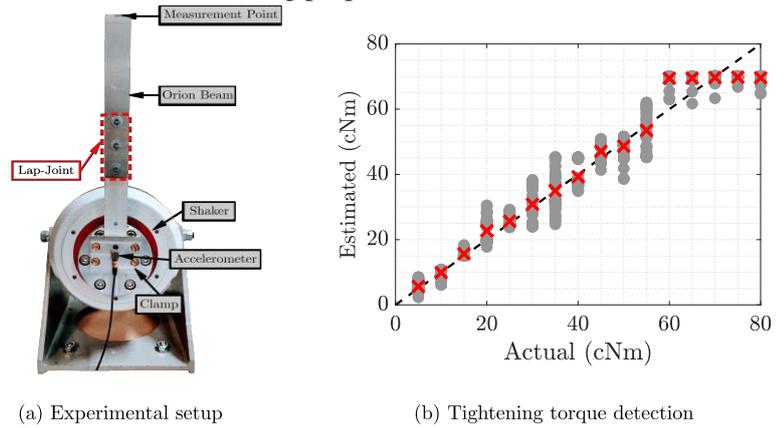


Figure 1. (a) The Orion beam [1]; (b) estimated torque (x) versus actual torque (--) .

Figure 1(b) shows the comparison between actual and estimated torques. The estimated mean values are generally close to the actual values, particularly for damaged conditions. However, accurately estimating tightening torque in healthy conditions is limited because all healthy conditions are considered reference states when computing damage index. The results reveal that a mean torque of approximately 70 cNm is predicted for all conditions between 80 and 60 cNm, which are defined as indistinguishable healthy states. This imprecision does not reduce the methodology's performance.

CONCLUSION

By integrating the GMM and GPR methods, a straightforward approach to detect and quantify damage in structural connections has been developed, which has the potential to facilitate decision-making in bolted joint maintenance. With a supervised learning procedure, it is possible to calibrate the GPR-based model and achieve reasonable accuracy in quantifying the severity of the damage, making this methodology suitable for industrial applications.

Références

[1] R. de O. Teloli, P. Butaud, G. Chevallier, S. da Silva. *Good practices for designing and experimental testing of dynamically excited jointed structures: the Orion beam*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022.

DEMARCHE FIABILITE PREVISIONELLE ET ASSEMBLAGES MECANQUES

M.Pont¹, M. Béranger¹, B. Henocq¹, G. Morin¹

1. RENAULT, Technocentre, 1 avenue du golf, 78280 Guyancourt, France

MOTS CLES : Fiabilité Prévisionnelle, Contrainte Résistance, Palier Vilebrequin, Tirant Rotor, Joint de culasse

INTRODUCTION

Qu'ils soient permanents ou démontables, les assemblages mécaniques sont incontournables dans la réalisation d'un groupe moto-propulseur (GMP).

Leur développement peut se décomposer en 2 phases, une première de conception qui s'appuie sur des règles métier ou des modèles E.F., et une seconde de validation. Cette dernière consiste à déterminer un cycle et une durée d'endurance qui permettent d'éclairer la fiabilité de l'assemblage en clientèle.

L'étude portera justement sur les méthodes numériques existantes pour 'dimensionner' un tel essai à travers la présentation de 3 cas industriels.

METHODES NUMERIQUES

Lors du développement d'une innovation et donc en l'absence de retour réseau, les outils de fiabilité prévisionnelle s'articulent principalement autour de la méthode contrainte - résistance.

Pour que cette dernière soit menée à bien, les répartitions de la contrainte et de la résistance doivent être exprimées selon un même facteur synthétique.

Les méthodes disponibles pour construire ce facteur synthétique dépendent de la précision attendue et/ou du délai de réponse souhaité :

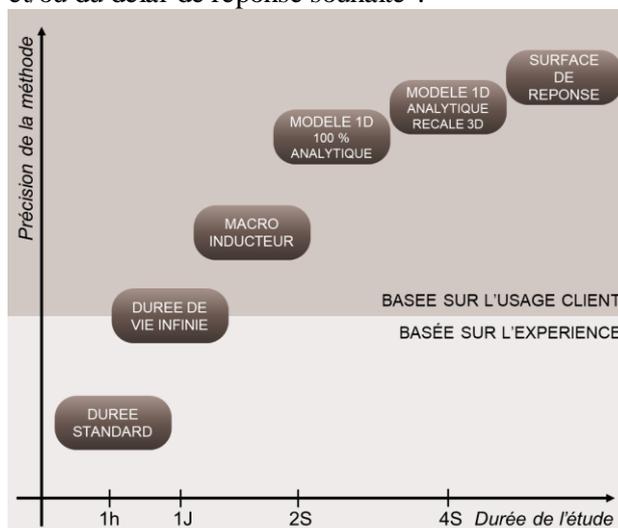


Figure 1 : Méthodes de construction du facteur synthétique

Cette étape cruciale, propre à chaque assemblage, peut être appréhendée via les techniques :

- Du **Macro inducteur** : les contraintes mécaniques sont supposées proportionnelles à une grandeur macroscopique (pression, T° , Efforts ...)
- Du **Modèle 1D** qui lie l'usage à la contrainte mécanique par un modèle analytique [1].
- Ou de la **Surface de réponse** qui s'appuie sur un plan d'expérience E.F.

APPLICATION INDUSTRIELLE

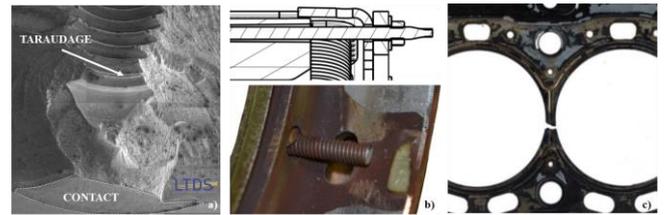


Figure 2 : Présentation des cas industriels

Pour illustrer ces méthodes, seront présentés :

- Un palier vilebrequin (macro inducteur - Fretting fatigue) [2]
- Un tirant de fermeture d'un rotor bobiné (Modèle 1D recalé 3D - fatigue LCF)
- L'étanchéité 'Culasse - Carter cylindre' (Surface de réponse - Fatigue HCF d'un joint de culasse).

CONCLUSION

Devenues indispensables, les méthodes numériques liées à la fiabilité prévisionnelle couvrent désormais un large panel d'assemblages du GMP. La pertinence de ces approches se joue alors dans la construction d'un facteur synthétique qui doit être le plus fidèle au mode d'endommagement redouté.

Références

- [1] G. Morin, E. Nicouleau-Bourles, F. Simon, O. Prince (2005), « *Reliable Diesel Engine Design based on a new numerical method* », SAE, 2005-01-1762
- [2] M. Pont, D. Miazga, G. Morin, S. Fouvry (2023) « *Approche fretting-fatigue simplifiée appliquée à un cas industriel* », SF2M – Journées de Printemps.

Sophisticated Bolt Thread Approach for Bolt Loosening Analysis Applied to Industrial Tasks

Michael Klein¹, Jacques Marchesini² and Laurent Dastugue²

1. INTES GmbH, Stuttgart, Germany

2. INTES France, Rambouillet, France

KEYWORDS : Bolt loosening, simulation, prediction, pretension, contact

INTRODUCTION

Self-loosening is always mission critical. When bolts lose pretension during operation, it means structural failure and loss of designed functionality. The current understanding of bolt self-loosening is that bending of the bolt is an important trigger. Simulation based parameter studies should support understand the mechanisms of the process under a wide range of several parameters. First objective is to predict bolt loosening by simulation.

Ultimate objective for industrial models is to define a model technique and indicators to predict bolt loosening for multi bolt models. In order to achieve this demanding goal, the modelling must be simplified, the runtime reduced while maintaining the accuracy.

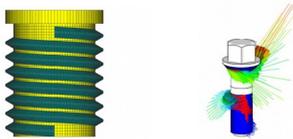


Figure 1: Bolt model with meshed thread (left) and frictional forces and contact status (right).

METHODOLOGY

It was assumed that a detailed modeling of the thread is necessary in order to obtain this knowledge. But the more details are increasing the computation time drastically, which makes this approach not usable for multi body/bolt designs. So, simplified bolt models with advanced pretension functionality are needed, which gives reliable indication for bolt loosening. This leads to the main question: Is an advanced pretension functionality for model without thread sufficient to evaluate the tendency of loosening?

An advanced contact with thread system on cylindrical model is shown. The accuracy of the contact directions and the contact forces in the thread area is significantly increased through the use of screw parameters and thread coordinate system. At the same time, the modeling effort and the computing time are kept low.

The screw connection of a rim is shown as an example. Different bolt and thread parameters are compared to check the predictability of the new approach.



Figure 2: Wheel model with 5 rim bolts.

RESULTS

Accurate results in correct contact directions lead to excellent prediction of loosening process. Both contact regions, bolt head and thread, of the bolt are taken into account exactly. These two areas are essential for screw loosening. The contact forces in the normal and friction directions are the basis. The force directions take the thread into account without detailed modelling.

CONCLUSION

A successful approach for simulating the prediction of screw loosening was demonstrated. The approach is based on a simplified thread system contact. This allows fast conventional, without detailed thread, solid modelling of bolts, which enables industrial use in models with many screws. At the same time, this method drastically reduces the computing times compared to modelled threads, which in turn makes industrial use possible.

References

- [1] G. Junker (1969) « *New Criteria for Self-Loosening of Fasteners Under Vibration* », SAE Transactions, **78**, pp. 314-335.
- [2] M. Klein (2021) « *Is Bolt Loosening Based on Advances Pretension Functionability Predictable ?* », NAFEMS World Congress.

SESSION 4: MAITRISE DES ASSEMBLAGES

Vers une maîtrise du serrage au couple grâce à un procédé d'assemblage innovant

A. Fau¹, A. Daidié¹, E. Delsol¹

1. Institut Clément Ader (ICA), Université de Toulouse, CNRS, IMT Mines Albi, INSA, ISAE-SUPAERO, UPS, Toulouse, France

MOTS CLES : Assemblage boulonné, Serrage au couple, Précharge, Réalité augmentée

INTRODUCTION

Le serrage des assemblages boulonnés, dans les systèmes mécaniques, revêt une importance majeure. La maîtrise du procédé de serrage en tension, combinant le serrage au couple et à l'angle est essentielle. L'idée proposée dans ces travaux de recherche est de concevoir un procédé d'assemblage intelligent qui allie l'utilisation des outils connectés et de la Réalité Augmentée. L'objectif est d'associer ces nouvelles technologies pour maîtriser la précharge installée dans l'assemblage durant le serrage ainsi que pour assister l'opérateur dans la réalisation de la gamme de montage.

LA MAITRISE DE LA PRECHARGE, UN ENJEUX MAJEUR

Pour le serrage des assemblages boulonnés, les outils de serrage connectés (clé dynamométrique ou visseuse) sont désormais communicants et fournissent en temps réel le couple et l'angle de serrage. L'analyse du comportement de l'assemblage, pendant le serrage, devient envisageable ce qui offre la possibilité de maîtriser la précharge installée [1].

La mise en contact des différents éléments de l'assemblage, au début de serrage, permet d'établir un couple d'accostage qui doit être considéré comme le début du serrage. Pour chaque assemblage, la valeur de ce couple d'accostage est identifiée, afin de pouvoir corriger la valeur du couple final (de consigne). Une fois le serrage réellement effectif, la relation couple-angle est linéaire, la valeur de la précharge en temps réel est donc accessible. Il est désormais possible de s'affranchir des phénomènes dispersifs du serrage au couple pour aller vers un serrage en tension.

LA REALITE AUGMENTEE, UN OUTIL POUR FIABILISER L'ASSEMBLAGE

Dans une démarche de fiabilisation globale du procédé d'assemblage, les outils connectés sont associés à de la Réalité Augmentée. Cette dernière,

très utilisée durant la phase d'assemblage, mais également de maintenance [2], permet d'assister l'opérateur pendant le montage des sous-ensembles mécaniques et limite les non-conformités liées aux erreurs de montage. L'opérateur est assisté pour réaliser les séquences de serrage, les vis à serrer étant mises en évidence. De plus, l'opérateur n'a plus à paramétrer la clé dynamométrique puisque la consigne du couple à appliquer est prédéfinie dans la gamme de montage virtuelle et automatiquement envoyée à l'outil connecté lorsqu'un serrage doit être effectué. La conformité du serrage est également vérifiée et les valeurs des couples de serrage appliqués alimentent une base de données utilisée pour la traçabilité des opérations d'assemblage. La Réalité Augmentée peut également permettre des maintenances à distance, l'expert assemblage n'est alors plus amené, dans une première phase de maintenance, à se déplacer mais peut assurer ses missions à distance.

CONCLUSION

L'association des outils connectés et de la Réalité Augmentée est aujourd'hui utilisée, afin de maîtriser la précharge installée dans un assemblage boulonné lors d'un serrage au couple. La facilité de mise en œuvre du procédé de serrage est alors préservée mais sa dispersion est fortement diminuée. Afin de rendre le procédé d'assemblage moins contraignant pour les opérateurs, la géolocalisation des outils apparaît comme une solution pertinente pour envoyer à la clé dynamométrique, une fois la localisation de l'outil validée, la consigne du couple à appliquer à la vis.

Références

- [1] T. Fukuoka. *The mechanics of threaded fasteners and bolted joints for engineering and design*, Elsevier, 2022, pp.365, ISBN: 978-0-323-95357-3
- [2] J. Husár, L. Knapčíková. *Implementation of augmented reality in smart engineering manufacturing: literature review*, Mobile Networks and Applications, 2023, pp.1-14, doi:10.1007/s11036-023-02121-x

SIMULATION NUMERIQUE DU VIEILLISSEMENT DES JOINTS METALLIQUES : INFLUENCE DE LA TEMPERATURE ET DES VARIATIONS DE PRESSION

F. LEDRAPPIER¹, J. F. JULIAA¹, P. CHARVIN², T. ZAOUTER²

1. *TECHNETICS Group France, Laboratoire d'Étanchéité Maestral F-26700 Pierrelatte, France*

2. *CEA, DES, ISEC, DPME, SEME, Laboratoire d'Étanchéité Maestral, Univ. Montpellier, Marcoule, France.*

MOTS CLES : Étanchéité, Fluage, Simulation numérique

INTRODUCTION

Les joints métalliques HELICOFLEX® sont utilisés pour l'étanchéité de conteneurs de stockage et transport de combustibles nucléaires usagés. Dans ce contexte, le fluage des matériaux d'étanchéité conduit à un vieillissement des joints, qui se traduit par une évolution des caractéristiques (restitution élastique et effort de réaction) au cours du temps, sur l'échelle de plusieurs décennies. Ces phénomènes ont été étudiés à travers des essais de vieillissement accélérés, à différentes températures, afin d'évaluer l'aptitude des joints à rester étanches après des situations accidentelles de référence après vieillissement.

SIMULATION DU VIEILLISSEMENT ET REDUCTION DU MODELE NUMERIQUE

A partir d'une base de donnée expérimentale significative (plus de 400 mesures réalisées sur 12 ans), un modèle numérique du vieillissement des joints a été développé pour décrire leur relaxation. Si ces essais ont été réalisés dans des conditions de laboratoire, avec une température constante, la simulation numérique permet d'appréhender l'influence des différents scénarios de vieillissement, incluant des variations de température, de délestage du joint ou une pression interne. Les cas de chargement les plus simples, ne considérant qu'une variation de la température par exemple, le comportement peut être décrit de manière satisfaisante à l'aide d'une équivalence temps-Température basée sur le paramètre de Larson-Miller. Cependant, l'étude de scénario plus complexes (i.e. combinant plusieurs facteurs comme le délestage ou la pression de service avec la variation de température) s'avère moins évidente.

Le calcul numérique par la méthode des éléments finis permet d'appréhender les différents mécanismes mis en jeux, mais nécessite quelques heures de calcul pour chaque cas de figure. Ces temps de calculs ne sont pas compatibles avec la

réactivité recherchée pour le suivi d'installations. Une approche spécifique a donc été mise au point afin de disposer d'une réponse en temps réel sur l'état de santé du joint en cours d'utilisation. La démarche consiste à construire une base d'apprentissage sur la base de simulations numériques du vieillissement des joints, avec une grande variété de scénarios de vieillissement (température, pression...). Un modèle réduit, basé sur des outils de machine-learning, est ensuite développé et entraîné sur cette base de donnée.

CONCLUSION

L'outil mis au point, propre à une liaison étanche et à une application donnée, permet de décrire de manière satisfaisante le comportement du joint en temps réel, sur la base de paramètres mesurés. Le modèle réduit, exportable et utilisable avec des ressources de calcul limitées, peut alors compléter une instrumentation existante en proposant une information sur la restitution élastique résiduelle du joint, sa capacité à s'accommoder à des situations accidentelles de référence, ou la nécessiter de panifier une maintenance préventive.

SESSION 5: NORMES ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Fixations et Assemblages : Symbiose Recherche & Développement et Normalisation

J. Péchenard¹, C. Delcher²

1. ARTEMA, Organisation professionnelle des industriels de la Mécatronique (Groupe Fixations)
2. CETIM Saint-Etienne, Pôle Ingénierie Des Assemblages (IDA)

MOTS CLES : Recherche, Développement, Normalisation, Assemblage, Fixation, Essai

INTRODUCTION

Les fixations sont des composants largement normalisés ce qui participe fortement à leur utilisation industrielle très étendue. A l'origine, la normalisation internationale a permis d'obtenir des fixations dont la géométrie et les caractéristiques mécaniques sont connues et communes à tout utilisateur et ceci dans le monde entier. Aujourd'hui les travaux de normalisation permettent de garantir l'utilisation de produits toujours plus fiables et de qualité mais aussi de proposer des méthodes d'essai évoluées pour évaluer leurs performances.

En collaboration étroite depuis les années 90, le CETIM et ARTEMA participent ensemble et activement aux travaux de R&D et de Normalisation dans le domaine des fixations.

Quels sont ces travaux et qu'apportent-ils ?

RECHERCHES ET RÉFÉRENTIELS NORMATIFS « up-to-date »

La normalisation fait appel à des travaux de recherche afin d'apporter des données factuelles pesant dans les discussions internationales et permettant un enrichissement des référentiels existants.

Les résultats de R&D permettent d'initier de nouvelles approches, méthodologies mais aussi d'instruire la création de nouvelles normes.

Les principaux sujets actuellement étudiés par le CETIM et ARTEMA sont synthétisés dans le tableau suivant :

SUJETS	NORMES ASSOCIÉES
Caractéristiques mécaniques	
▪ Écrou en acier	ISO 898-2
▪ Fixations en inox	ISO 3506-1 à 7
Conception et dimensionnement	
▪ Code de calcul	NF E 25-030
▪ Approche multi-fixations	(R&D CETIM projet PSS FOVA)
Maîtrise du serrage	
▪ Essais Couple/Tension : fixations acier	ISO 16047 & NF E 25-039
▪ Essais Couple/Tension : fixations inox	NF E 25-035
▪ Essais Couple/angle	(R&D CETIM projet PSS FOVA)
Tenue en service	
▪ Résistance au dévissage	NF E 25-046
▪ Résistance au glissement	(R&D CETIM projet PSS FOVA)
▪ Résistance à la corrosion	ISO 4042, etc
▪ Corrosion galvanique	NF E 25-032
▪ Tenue à chaud des fixations inox	ISO 3506-5

Table 1 : Principaux sujets actuellement étudiés

Ci-dessous quelques exemples de problématiques rencontrées :

- Comment se prémunir de tous risques d'arrachement de filetage d'écrous standards en acier, en inox, de grandes dimensions, etc. ?

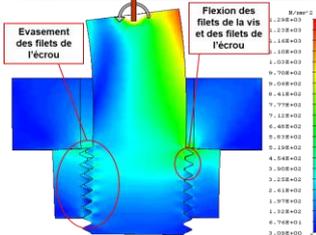


Figure 1 : Tenue à l'arrachement des écrous acier et inox ISO

- Comment s'assurer des caractéristiques mécaniques des fixations finies en inox écroui ?

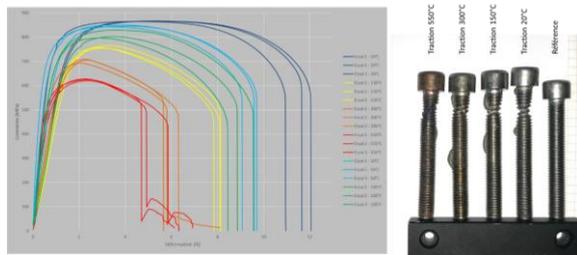


Figure 2 : Comportement à chaud des fixations inox en lien avec la NF EN ISO 3506-5

- Comprendre les phénomènes et établir des méthodes d'essai les plus fiables et répétables possible : pour la caractérisation Couple/Tension, pour la résistance au dévissage, pour le glissement aux interfaces, pour la tenue à la corrosion, etc.

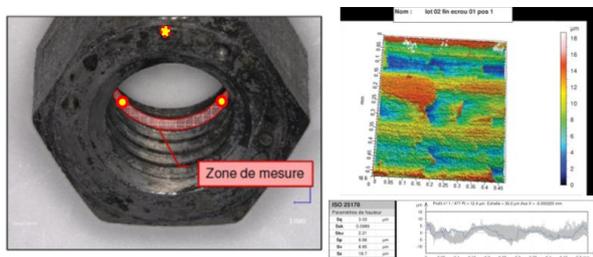


Figure 3 : Influence de l'état de surface des flancs de filet en lien avec la NF EN ISO 16047

- Comment optimiser ses assemblages par des méthodes de conception et dimensionnement avancées ?

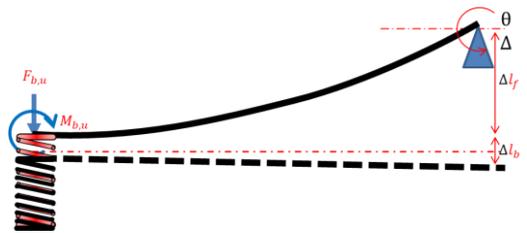


Figure 4 : Nouvelle approche pour la distribution de la charge externe (Z. CHAIB)

CONCLUSION

Pour l'ensemble de ces sujets, les problématiques ainsi que les interactions entre R&D et Normalisation seront présentées, et deux à trois thèmes seront plus particulièrement développés.

La réalisation de l'ensemble de ces travaux repose sur la participation active des industriels mécaniciens partageant leurs problématiques, leurs retours d'expérience et leur expertise.

Pour être acteur de ces avancées R&D, mais aussi **anticiper** les évolutions, défendre, **protéger** vos produits en normalisation et acquérir un **avantage concurrentiel**, vous pouvez vous rapprocher de vos Centres Techniques Industriels en fonction de vos professions (CETIM, CTICM, ...) et de vos syndicats ou associations professionnelles tels qu'ARTEMA.

Méthodologie de choix raisonné d'une technologie d'assemblage

C. Dalla Zuanna¹

1. CETIM Saint-Etienne, Pôle Performance Industrielle Durable (PID)

MOTS CLES : Conception, Développement, Normalisation, Assemblage, Fixation, Multimatériaux

INTRODUCTION

Il est généralement admis que l'assemblage des produits manufacturés constitue une part non négligeable des coûts du produit (30 à 40% représente un ratio facilement atteint). A ce titre, le choix des technologies d'assemblage représente une décision importante pour maximiser la performance technico-économique du produit. Ceci est accentué par le fait que cette décision est prise en amont dans le processus de développement produit.

Aujourd'hui, le choix d'une technologie d'assemblage procède très souvent d'un non-choix. En effet, le concepteur, au-delà de la validation par le calcul de l'utilisation d'une technologie d'assemblage, reproduit fréquemment l'existant lorsque la question du choix d'une technologie d'assemblage se pose.

Depuis le milieu des années 90, le CETIM travaille sur cette thématique dans l'optique de proposer une méthode robuste et universelle permettant d'adresser de façon la plus exhaustive possible le champ des possibilités lorsqu'il s'agit de répondre à un besoin d'assemblage.

Le résultat de ces travaux est aujourd'hui proposé à la communauté mécanicienne sous la forme d'une norme expérimentale.

CONTEXTE DE CHOIX D'UNE TECHNOLOGIE D'ASSEMBLAGE

Dans le processus global de conception d'un produit, la détermination d'une technologie d'assemblage relève d'un processus complexe où les matériaux (plusieurs dizaines de milliers) et les technologies d'assemblage foisonnent.

Devant la multiplicité des solutions possibles, la mise en œuvre de la méthode de choix doit donc prendre en compte l'ensemble des données pertinentes de la problématique industrielle permettant d'orienter le concepteur vers un choix technologique le plus optimum possible :

- Le cahier des charges fonctionnel du produit
- Les données industrielles
- Les avantages et inconvénients des technologies d'assemblage possibles
- La fin de vie du produit

PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE

En partant des éléments précédemment évoqués, le principe général de cette méthodologie consiste à

- exclure avec certitude les procédés d'assemblage qui ne correspondent pas aux critères du cahier des charges définis par le groupe de travail de l'entreprise,
- puis dans un deuxième temps de proposer un classement des procédés restant en attribuant pour chaque critères une note comprise entre 0 et 10

L'organigramme de la méthodologie peut être décrit comme proposé en figure 1.

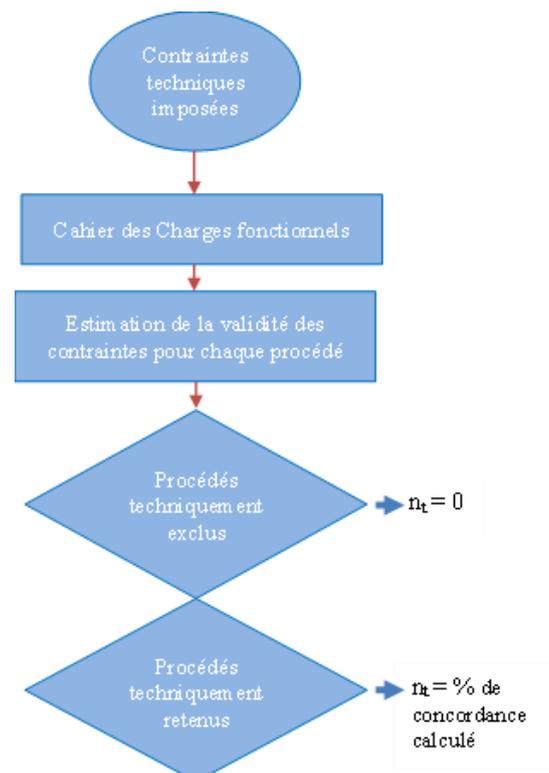


Figure 1 : Organigramme général de la méthodologie

La méthodologie proposée implique de d'identifier et définir les principaux éléments tels que décrit en figure 2.

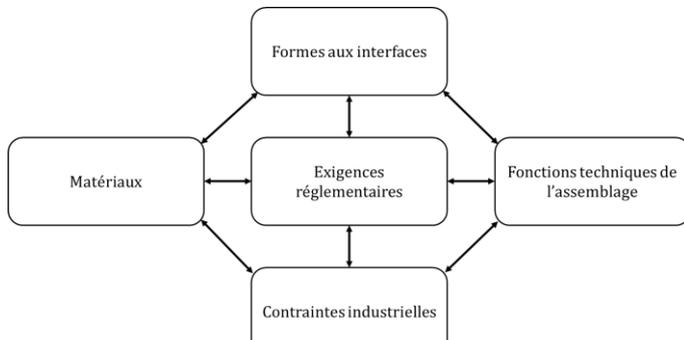


Figure 2 : Aspects à considérer pour l'analyse des besoins

L'analyse globale qui permet de passer de la définition des besoins à l'identification des technologies d'assemblage compatible intègre également une notion économique.

CONCLUSION

La méthode proposée dans cette norme expérimentale permet aujourd'hui de répondre de façon stricte à l'identification de technologies d'assemblage en réponse à un cahier des charges donnés.

Il décrit une méthodologie applicable depuis l'analyse des besoins du système jusqu'au choix des solutions d'assemblage, en ayant pris en considération de manière la plus exhaustive possible, les technologies d'assemblage envisageables et leur hybridation potentielle.

Et comme tous travail de normalisation, la réalisation de l'ensemble de ces travaux repose sur la participation active des industriels mécaniciens partageant leurs problématiques, leurs retours d'expérience et leurs expertises.

ÉTUDE COMPARATIVE DE LA RESISTANCE DE TIGES D'ANCRAGES SOLLICITEES EN TRACTION

R. Palacios¹, A. Rodier¹

1. CTICM

MOTS CLES : Tiges d'ancrage, traction, adhérence acier/béton

INTRODUCTION

Des essais de traction ont été réalisés avec pour objectif d'étudier les configurations d'ancrage de pieds de poteaux jusqu'ici non couvertes par les recommandations professionnelles [1].

Ces essais avaient également pour but d'évaluer l'adéquation d'une norme Eurocode sur les fixations pour béton récemment parue [2], pour déterminer la résistance des dispositifs utilisés en pieds de poteaux. Les modes de ruine observés ont donc été comparés à ceux qui étaient attendus pour les fixations couvertes par cette norme.

EPROUVETTES ET ESSAIS

Le plan expérimental comprenait 36 blocs de béton et 69 essais de traction comprenant :

- Des tiges droites non revêtues, électro-zinguées, ou galvanisées,
- Des crochets à simple ou double courbure, revêtus ou non (bruts, électro-zingués, galvanisés),
- Des tiges à queue de carpe revêtues ou non,
- Des tiges droites filetées sur toute leur longueur.

Chacun des ancrages est soumis à un effort de traction jusqu'à provoquer la ruine de l'éprouvette.

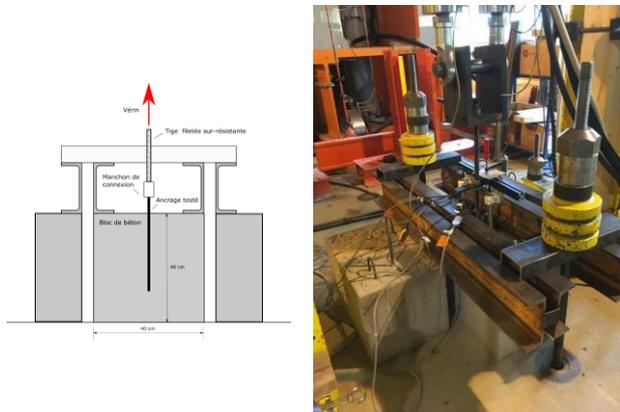


Figure 1: Dispositif d'essai

Le déplacement de la partie saillante de l'ancrage a été mesuré par des capteurs situés au niveau de la tige et au niveau de vérin.

RESULTATS ET COMMENTAIRES

Pour chaque typologie d'ancrage, un mode de ruine a été identifié. Pour certaines, le nombre de résultats a permis de mener une analyse statistique conduisant à la détermination de coefficients partiels conformément aux principes des Eurocodes. Ces coefficients ont été comparés à ceux indiqués dans les recommandations professionnelles.

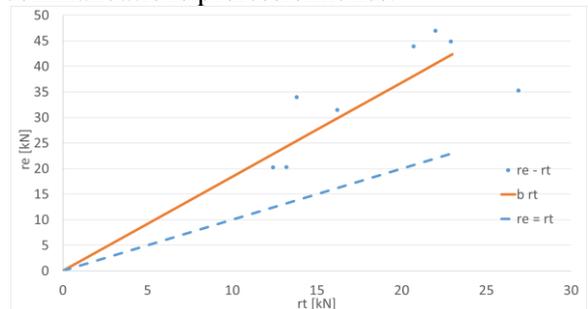


Figure 2: Résistances expérimentales en fonction des résistances théoriques.

Le mode de ruine par rupture de cône, typique des fixations pour béton, n'a pas été observé.

CONCLUSION

Les recommandations professionnelles peuvent être étendues à de nouvelles configurations d'ancrages tout en restant du côté de la sécurité. A l'inverse, ces essais ont mis en évidence que l'emploi de tiges droites non revêtues travaillant en traction est à éviter.

De plus, le recours à la norme sur les fixations pour béton ne semble pas être pertinent dans le cas des ancrages de pieds de poteaux.

Références

[1] **BNCM – CNC2M.** Recommandations pour le dimensionnement des assemblages selon la Partie 1-8 de l'Eurocode 3. 2015.

[2] **NF EN 1992-4.** Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 4 : Conception et calcul des éléments de fixation pour béton. AFNOR, 2018.

Evaluation de l'impact environnemental des vis

A. Gibert¹, N. Boucherit², C. Dalla Zuanna¹

1. CETIM Saint-Etienne, Pôle Performance Industrielle Durable (PID)
2. CETIM Nantes, Pôle Performance Industrielle Durable (PID)

MOTS CLES : Conception ; Développement ; ACV ; ICV ; Impact environnemental ; Fixation ; Changement climatique

INTRODUCTION

Dans un contexte général de prise de conscience sociétale des enjeux environnementaux, l'évaluation de l'impact environnemental des vis représente un premier niveau de réponse de la profession Fixations à ses enjeux.

Différents outils et méthodes sont disponibles sur le marché et permettent une évaluation de cet impact environnemental. Parmi ces outils, nous pouvons citer l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) qui est encadrée par les normes ISO 14040 et 14044.

L'ACV (cf. figure 1) est une méthode multi-étapes et multicritères basée sur le cycle de vie d'un produit. La réalisation d'une ACV permet d'extraire différents types de résultats comme l'impact carbone ou l'impact énergétique d'un produit. Le résultat de cette analyse peut être traduit en un unique indicateur environnemental : le changement climatique en kg eq. CO₂.

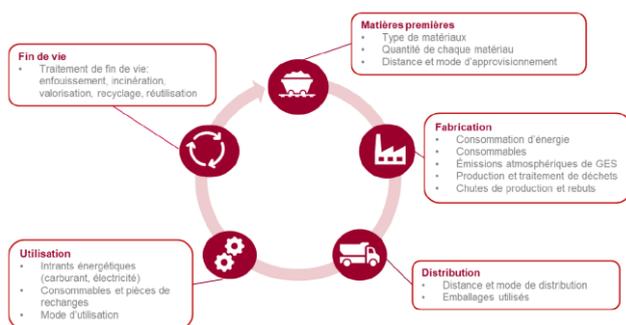


Figure 1 : Les différentes étapes du cycle de vie produit et les informations associées à récolter pour la réalisation d'une ACV

OBJECTIFS DE L'ETUDE

Dans le contexte environnemental actuel (Green deal européen, Carbon Disclosure Project, etc.), les industriels ont besoins de mesure l'impact

environnemental de chacun des procédés qu'ils utilisent de façon à en obtenir les données primaires.

Ces études impliquent donc de mettre en œuvre divers outils dont l'Inventaire du Cycle de Vie (ICV) et l'Analyse du Cycle de Vie (ACV). Les sorties de ces travaux permettent

- D'appréhender la dimension environnementale des procédés de fabrication
- D'avoir un outil et des données communes permettant de comparer deux ou plusieurs process
- D'avoir un instrument de mesure pour évaluer des options techniques
- Communiquer sur l'impact environnemental des produits
- Répondre aux exigences réglementaires

DEROULEMENT DE L'ETUDE

Deux approches complémentaires ont été mises en œuvre dans cette étude : approche globale et approche « en profondeur ».

La première consiste, via des calculs théoriques, à mettre en avant les flux prépondérants pour chaque procédé.

La seconde se base sur les résultats obtenus en amont afin de déterminer les flux nécessitant des mesures. Un plan de mesure est ensuite mis au point afin d'effectuer une étude temporelle prenant en compte les différents modes de fonctionnement du procédé.

Une focalisation sur la seconde approche implique la réalisation des étapes décrites ci-après :

- Définition des flux principaux (figure 2)

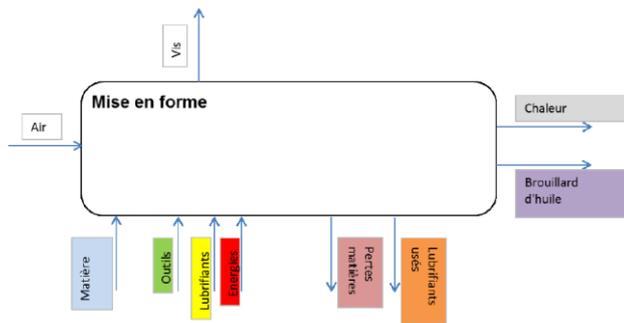


Figure 2 : Diagramme des flux du procédé mise en forme

- Collecte des données (soit par mesure physique sur machine, soit par extrapolation à partir des données de production d’une machine)
- Agrégation et traitement des données
- Modélisation des impacts de chaque procédé

Le résultat d’une modélisation des impacts environnementaux d’un procédé est présenté en figure 3.

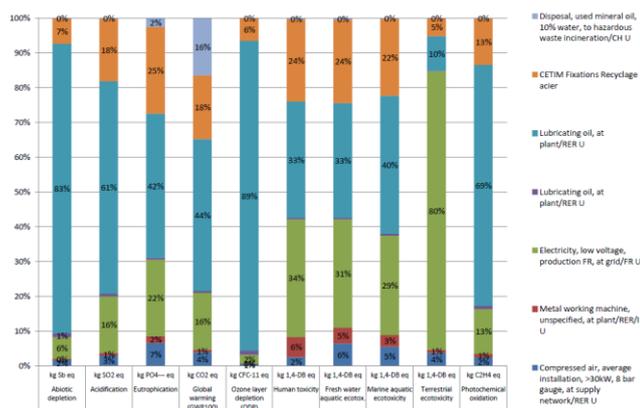


Figure 3 : Modélisation du procédé de mise en forme

CONCLUSION

Dans cette étude, deux méthodes étaient disponibles pour obtenir des informations sur la consommation énergétique et l’impact environnemental de la fabrication des vis.

La première méthode consiste à utiliser les bases de données environnementales existantes, Par exemple, Ecoinvent donnera des informations générales sur la consommation énergétique des étapes de fabrication des vis.

La deuxième méthode consiste à réaliser des campagnes de mesures énergétiques sur les différents procédés industriels internes pour la fabrication de vis. Cette méthode permet d’obtenir des données

spécifiques aux vis produites. En effet, les études montrent une certaine disparité de consommation énergétique en fonction du type de vis produite et de machine utilisée. Il est donc peu pertinent de conclure sur une consommation énergétique générale pour une vis.

Un des intérêts de ce type d’étude est l’obtention de données environnementales fiables et robustes sur les procédés de fabrication des éléments de fixation qui pourront ensuite être utilisées comme données primaires dans les ACV produit. Il convient cependant de porter une attention particulière à la mise à jour de ces données.

**SESSION 6: MODELISATION ET
DIMENSIONNEMENT: MODELES
DE COMPORTEMENT**

MODELISATIONS DES ASSEMBLAGES MÉCANIQUES DES IMMEUBLES EN BOIS DE GRANDE HAUTEUR

D. Gomez¹, G. Cumunel¹, M. Bornert¹, N. Peyret² et T. Catterou³

1. Navier, Ecole des Ponts, Université Gustave Eiffel, CNRS, F-77455 Marne-la-Vallée, France.

2. Laboratoire Quartz (EA7393), ISAE – Supméca, 3 rue Fernand Hainaut, Saint-Ouen, 93400, France.

3. FCBA, Institut technologique du bois, Allée du Boutaut, Bordeaux, 33000, France.

MOTS CLES : Assemblage bois, comportement hystérétique

INTRODUCTION

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet ANR DynaTimberEyes et s'intéresse aux assemblages métalliques de type tige (boulon, broche, vis) qui sont récurrents dans la construction en bois.

Dans ce type d'assemblage, des phénomènes de friction et d'écrasement induisent un comportement non linéaire. Des défauts présents dans les matériaux ou lors de la construction ont également un impact sur les phénomènes mis en jeu.

Le présent projet de recherche vise ainsi à caractériser le comportement non linéaire de ces assemblages.

COMPORTEMENT STATIQUE

L'assemblage type (Figure 1) peut reprendre des efforts dans son plan (parallèle à la plaque en acier), essentiellement des efforts normaux.

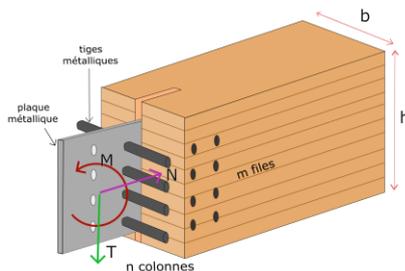


Figure 1. Assemblage avec broches

Les normes EN 309 et 1380 spécifient les tests de mesure de portance, de résistance et de déformation d'un assemblage de type tige. L'Eurocode 5 spécifie des formules pour la résistance et la raideur de ces assemblages. Des améliorations sont proposées comme l'inclusion de vis de renforcement contre le fendage [1]. La raideur calculée avec l'Eurocode 5 présente des différences importantes avec les essais [1]. En outre, la friction n'est pas prise en compte alors qu'elle augmente la résistance et le déplacement maximal avant la rupture de l'assemblage [1].

COMPORTEMENT CYCLIQUE

Le comportement de l'assemblage impacte le comportement dynamique de la structure complète [2], d'où l'importance de caractériser le comportement hystérétique de l'assemblage.

La norme EN 12512 spécifie le test cyclique pour des assemblages de type tige. D'autres protocoles existent aussi (CUREE, etc.) selon le type d'éléments testés.

La modélisation du comportement hystérétique de l'assemblage sous ces conditions de chargement peut être réalisé avec des modèles éléments finis, des modèles physiques ou des modèles phénoménologiques [2]. Ces derniers sont plus efficaces en temps de calcul en présence de plusieurs assemblages. Les modèles Saws, Humbert et BWBN font partie des modèles phénoménologiques récurrents. Ils seront évalués en fonction des paramètres utilisés, de leur complexité et de leur efficacité.

CONCLUSION

Les assemblages de type tige sont sollicités par des efforts dans leur plan. Dans l'Eurocode 5, la raideur donnée n'est pas applicable pour des calculs en déformation. La friction et le jeu de mise en œuvre devraient être mieux pris en compte.

Pour un chargement cyclique, les modèles phénoménologiques semblent être plus adaptés pour traduire le comportement hystérétique de l'assemblage, mais les modèles de friction peuvent également être appliqués.

Références

- [1] M. Dorn, K. De Borst, J. Eberhardsteiner, *Experiments on dowel-type timber connections*, Engineering structures, 47 (2013) 67-80.
- [2] H. Dong, M. He, X. Wang, C. Christopoulos, Z. Li, Z. Shu, *Development of a uniaxial hysteretic model for dowel-type timber joints in OpenSees*, Construction and Building Materials, 288 (2021) 123112.

Nouvelle approche de distribution de la charge externe sur les fixations

Z. CHAIB¹ et C. DELCHER¹

1. CETIM Saint-Etienne Pôle Ingénierie Des Assemblages (IDA)

MOTS CLES : Assemblage, Distribution de la charge, multi-fixations

INTRODUCTION

Les fixations sont des composants conçus pour assembler deux ou plusieurs pièces entre elles. La conception d'une liaison, passant par les étapes de choix de technologie d'assemblage, définitions des paramètres géométriques et physiques, morphologie des fixations, demeure fortement dépendante de l'environnement dans lequel va travailler l'assemblage et de la distribution de la charge sur chaque point de fixation. Aujourd'hui, on dispose de deux approches : une analytique (Corps rigides), simple et rapide mais peu précise et une autre (EF) lourde et parfois complexe mais plus précise selon les conditions aux limites pratiquées.

Ce présent article présente et détaille une nouvelle approche analytique qui offre des résultats acceptables industriellement, ce qui aide à optimiser le positionnement des points des fixations (vis ou rivets) sans faire appel aux méthodes des éléments finis qui pourront se limiter à la phase de validation finale de la structure.

PRINCIPALES APPROCHES EXISTANTES TRAITANT DE LA DISTRIBUTION DES CHARGES EXTERNES

La distribution de la charge a été traitée par plusieurs auteurs. De même, elle a été introduite dans certaines normes et recommandations dont on peut citer Eurocode, NF E 25-030-2 (cas de pièces cylindriques) et VDI 2230-2. On distingue deux grandes familles :

- 1- Distribution d'une charge transversale : elle a fait l'objet de plusieurs travaux (*M. Sinthusiri et NASSAR, E. Paroissien, VDI 2230-2,...*)
- 2- Distribution d'une charge axiale : elle a été traitée par un nombre très réduit d'auteurs et dont la majorité des travaux sont basés sur le principe du mouvement d'un corps rigide. Ici on peut citer la VDI 2230-2, les travaux de Welch ainsi que l'Eurocode (ou également la recommandation CNC2M). Les modèles traitant de la distribution de la charge avec des corps élastiques sont très limités et

s'orientent plutôt vers des modèles EF simplifiés (*J. CHAKHARI*).

Compte-tenu de l'évolution des matériaux, des moyens de calcul et des moyens de production, les pièces de structure sont devenues de plus en plus minces et souples. Dans ces conditions, l'hypothèse du corps rigide n'est plus valide.

Pour optimiser ses structures, l'industriel s'est orienté vers les calculs EF qui sont devenus plus accessibles qu'auparavant. Mais ces moyens sont des « boîtes noires », l'optimisation du positionnement des points de fixations se fait par itération et en se référant aux retours d'expérience du designer. Ceci complexifie la vie des industriels et des jeunes concepteurs.

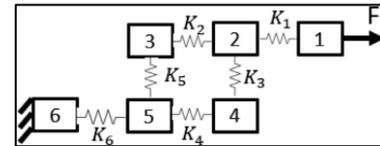


Figure 1 : Travaux de M. Sinthusiri et NASSAR

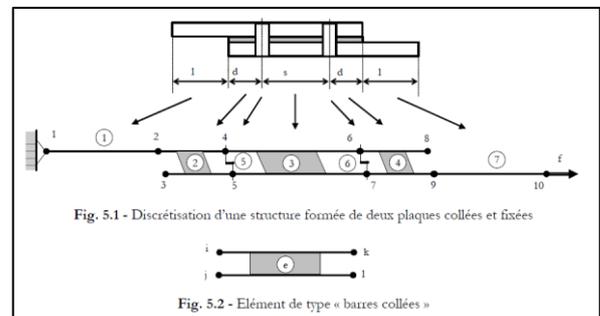


Figure 2 : Modélisation d'un assemblage hybride (colle + rivets) selon E. Paroissien

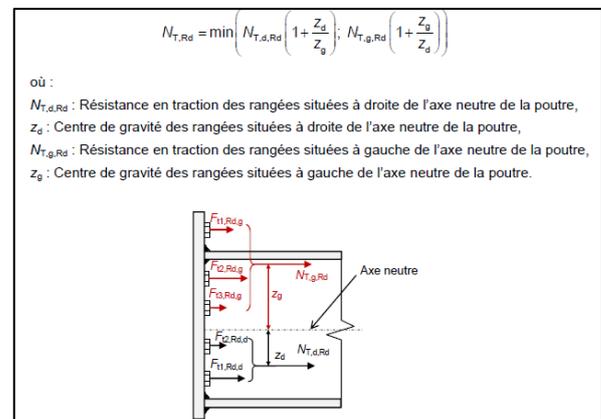


Figure 3 : Extrait de la recommandation CNC2M illustrant une distribution particulière

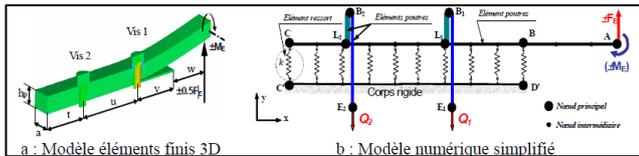


Figure 4 : Description du modèle EF-Simplifié développé par J. CHAKHARI

NOUVELLE APPROCHE MISE EN PLACE

La nouvelle approche mise en place cherche à conserver une facilité d'utilisation tout en perfectionnant les méthodes existantes grâce à une prise en compte de l'ensemble des paramètres influant sur la distribution de la charge, à savoir : l'épaisseur des pièces, la précharge dans chaque fixation si elle existe, le jeu initial entre la pièce et chaque point de fixation...

Cette approche consiste à pondérer la charge externe sur l'ensemble des fixations en se basant sur leurs efforts de réaction pour un déplacement et/ou une rotation imposés au point de chargement.

Les travaux réalisés dans ce développement ont abouti à la définition d'une approche prenant en compte deux principales situations :

- 1- Une première traitant d'un comportement de service où les critères de non-décollement et de non-glissement sont respectés
- 2- Une deuxième, par une démarche itérative, où le comportement de chaque fixation peut être non-linéaire (situation de décollement et/ou glissement).

L'ensemble des formulations et des validations basées sur des travaux numériques (EF 3D) et expérimentaux seront exposés dans la présentation.

CONCLUSION

Bien que les formulations soient conçues sur la base de formes et d'équations RDM basiques, les résultats obtenus sont plus réalistes que ceux issus des méthodes analytiques existantes (ou conformes à certains modèles existants dans des situations spécifiques).

Ces formulations prennent en compte les paramètres suivants : position des points d'assemblage, diamètres des fixations et des trous de passage, efforts de serrage pour chaque fixation, coefficient de frottement, facteurs de charge ou de filtrage de chaque fixation, coefficient d'introduction de la charge ainsi que le torseur des sollicitations externes.

Références

- [1] NF E 25-030-2 (2014-08-23) : Fixations - Assemblages vissés à filetage métrique ISO - Partie 2 : règles de conception pour les assemblages précontraints - Démarche complète
- [2] VDI-2230-Part2. – Systematische Berechnung Hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zylindrische Einschraubenverbindungen
- [3] Chaiwat Sinthusiri , Sayed A. Nassar : Load distributions in bolted single lap joints under non-central tensile shear loading, Journal of Advanced Joining Processes 3 (2021) 100055
- [4] NF EN 1993-1-8 (Décembre-2005) : Eurocode 3 : Calcul des structures en acier Partie 1-8 : Calcul des assemblages
- [5] BNCM / CNC2M – N0175: Recommendation pour le tensionnement des assemblages selon la NF 1993-1-8 (Avril 2015)
- [6] Offshore standards — DNVGL-OS-C101. Edition July 2019, Design of offshore steel structures, general - LRFD method
- [7] J. W. Hu , R. T. Leon & T. Park : Mechanical models for the analysis of bolted T-stub connections under cyclic loads, Journal of Constructional Steel Research 78 (2012) 45–57
- [8] E. Paroissien : Contribution aux assemblages hybrides (boulonnés/collés) - Application aux jonctions aéronautiques, rapport de these de doctorat de l'université de Toulouse III, Novembre 2006
- [9] J. H. Bickford : Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints Non-Gasketed Joints Fourth Edition, <http://www.taylorandfrancis.com>
- [10] M. Welch: Classical analysis of preloaded bolted joint load distributions, International Journal of Structural Integrity, Vol. 9 Issue: 4, pp.455-464, <https://doi.org/10.1108/IJSI-07-2017-0045>
- [11] J. GUILLOT : Assemblages par éléments filetés, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique-B 5 560
- [12] J. CHAKHARI : Modélisation d'une fixation par éléments filetés d'une structure à forte excentration de chargement et soumise à des sollicitations de fatigue : Rapport de thèse de doctorat à l'INSA de Toulouse, Juillet 2007
- [13] Z. CHAIB : Étude du comportement des fixations par vis des couronnes de guidage de grand diamètre : Élaboration d'un outil de dimensionnement : Rapport de thèse de doctorat à l'INSA de Toulouse, Février 2008
- [14] CETIM-COBRA: Logiciels métier traitant du dimensionnement des assemblages précontraints : <https://www.cetim.fr/logiciels/cetim-cobra/>

Numerical modeling of plastic deformation assembly methods

N. El Kousseifi¹, P. Lasne¹, E. Perchat¹, M. Binagot¹

1. Transvalor S.A., 950 avenue Roumanille, CS 40237 Biot, 06904 Sophia Antipolis–Cedex, France

Key Words: Finite element, Multi-bodies contact, Mechanical joining, Clinching, Punch riveting, Self-piercing riveting

INTRODUCTION

The mechanical joining process offers several advantages compared to other joining techniques (adhesive joining or welding). It can be used for weldable and non-weldable materials, aluminium and magnesium alloys, and brings benefits to lightweight industry. There is no chemical interaction during this process (no change in chemical composition or microstructure) and its efficiency depends only on the materials, and not on atomic or molecular bonds.

When using mechanical joining, dissimilar materials can be assembled (metal-glass or metal-plastics) and dismantled under certain conditions. The drawbacks of this process are the possibility of fatigue phenomena or corrosion at the fastening point, as well as self-loosening.

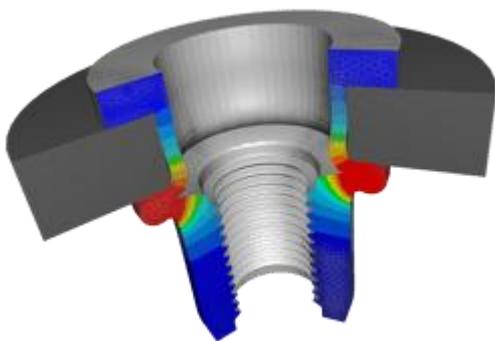


Figure 1 : Mechanical joining

BENEFITS OF A PREDECTIVE SIMULATION

Numerical simulations can be used to perform robust simulations to:

- Ensure process feasibility by checking every step of the ‘set-up’ phase
- Check the influence of process parameters (coating, etc.)

- Master dimensional control and fastener properties
- Take advantage of the initial conditions due to the manufacturing process (thermo-mechanical history of the material)
- Test the behaviour of the fastening solution under in-service conditions
- Predict fastening performances and lifetime

CASE STUDIES OF CLINCHING AND RIVETING PROCESSES

The clinching setup is axisymmetric, a 2D configuration is used in this case study.

To correctly estimate the final stress state of the assembly, an elastic unload simulation needs to be performed (figure 2). It is possible to use the “displacement view” feature available in the post-processor to magnify the display of the displacement field (figure 3).

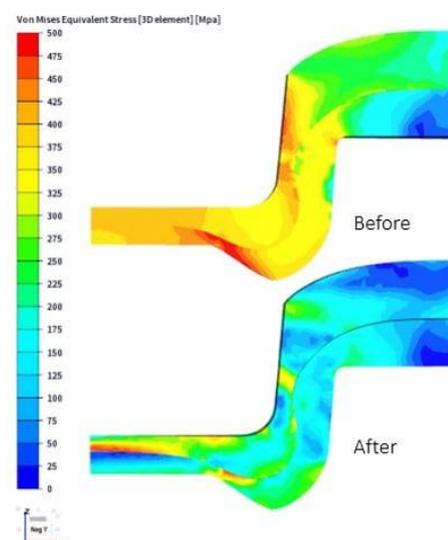


Figure 2: Distribution of von Mises stress before and after elastic unload

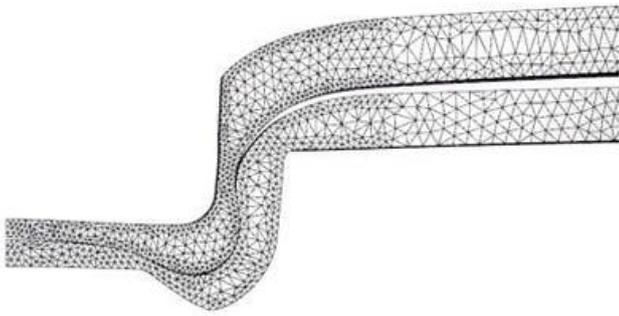


Figure 3: Displacement results during elastic unload magnified by 5

A simple tensile test can be modeled to observe stress loading. In this test, two dies are defined, one on the upper side, which will pull the upper sheet, and the other on the lower side, which will maintain the extremity of the lower sheet in position. The sticking behavior between dies and parts are ensured using the “bilateral sticking” friction file.

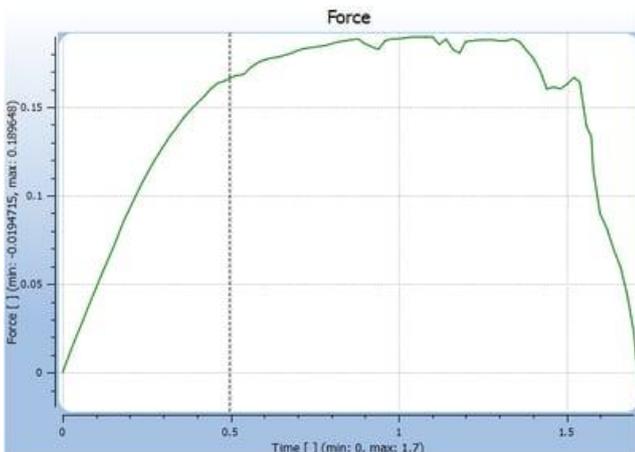


Figure 4: Disassembly force curve during the tensile test

This paragraph is dedicated to the results analysis for a self-piercing riveting case. The video presents the variation in the equivalent strain set from 0 to 3. At the end of the self-piercing riveting process, the release of stress due to the elastic unload is computed in the three main parts.

Figure 2 presents the distribution of Von Mises stress before and after elastic unload. A high stress spot can still be seen in the rivet.

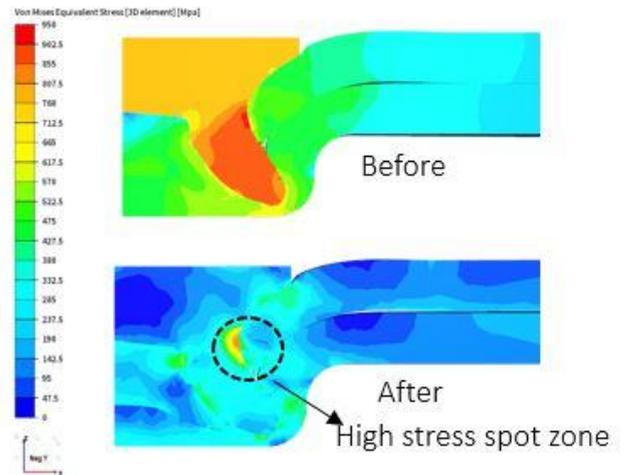


Figure 5: distribution of Von Mises stress before and after elastic unload

An analysis of shearing due to disassembly is also feasible. It is possible to plot and compute the disassembly force needed and the stress results as shown below.

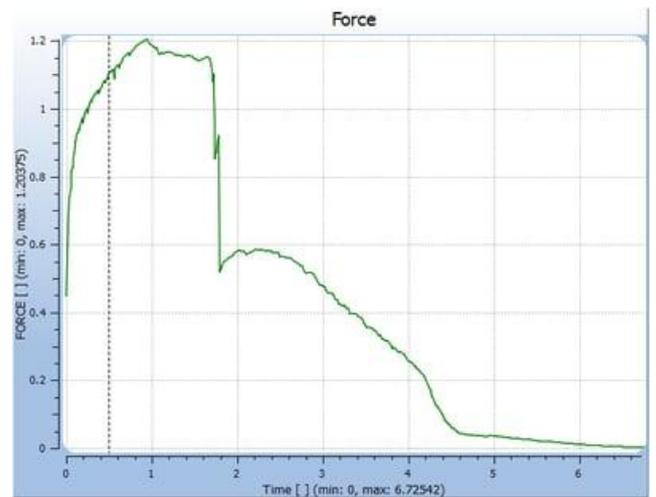


Figure 6: Disassembly force during the process

COMPETITIVE FEATURES OF FORGE® AND COLDFORM® FOR MECHANICAL JOINING

In recent years, several features have been developed to accurately model the mechanical joining process, which has led to improvements in the design and manufacturing of mechanical joints.

Here are some of the features that have been developed:

- Multi-body contact is modeled using a Master/Master or Master/Slave algorithm in 2D and Master/Slave algorithm in 3D, which facilitates mechanical resolution of coupling between the bodies [2].

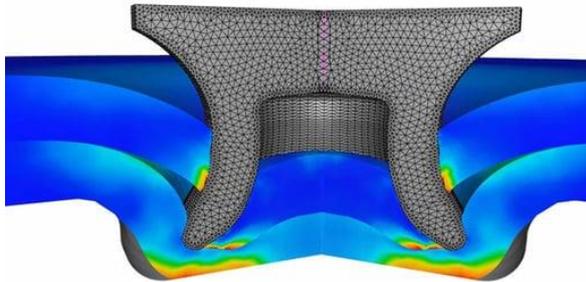


Figure 7: Latham Cockcroft criterion (damage) on a self-piercing riveting simulation

- During blind riveting applications: self-contact areas appear where the metal flows over itself.
- Your own material file can be created using the “Cold rheology generation tool”, or other material sources of data such as a JMatPro, Total Materia or FPD database.
- Self-adaptive remeshing is performed during the self-piercing riveting simulations on the boundary profiles.

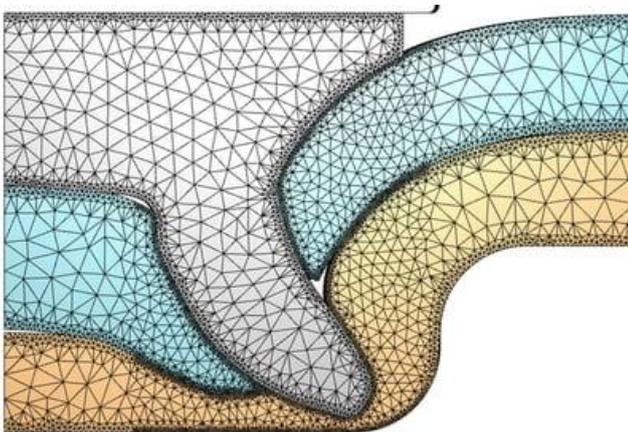


Figure 8: Self-adaptive remeshing

- Several damage & rupture criteria are developed and used as user routines, including Latham & Cockcroft, Oyane, Ryce&Tracey, Chaboche-Lemaitre, etc. [3-4-5]. These damage criteria can be used in self-piercing riveting simulations.
- Automatic element deletion is performed when the trigger value for damage criteria is reached.

CONCLUSION

FORGE® and COLDFORM® are finite element analysis software with robust capabilities to solve simulations with large plastic deformation of multi bodies. Therefore, it is suitable to model and analyze several mechanical joining processes such as clinching, punch riveting and self-piercing riveting.

References

- [1] P.O. Boucharda, T. Laurent, L. Tollier «Numerical modeling of self-pierce riveting - From riveting process modeling down to structural analysis» journal of materials processing technology 202 (2008) 290–300
- [2] E. Pichelin, K. Mocellin, L. Fourment and J.L. Chenot, «An application of a master-slave algorithm for solving 3D contact problems between deformable bodies in forming processes», European Journal of Finite Elements, 10, n°8, 2001, p. 857-880.
- [3] D. Petrescu et al., «Prediction of ductile fracture in the cold forging of steel», ESAFORM 2003; p. 919-922.
- [4] P.O. Bouchard, J. Signorelli, R. Boussetta and L. Fourment, «Damage and Adaptive Remeshing applied to 3D modeling of blanking and Milling», Computational Plasticity VII (COMPLAS), Barcelona, 2003.
- [5] P.O. Bouchard, F. Bay and Y. Chastel, «Numerical modelling of crack propagation: automatic remeshing and comparison of different criteria», Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 192, 2003, p. 3887-3908.

**SESSION 7: MODELISATION ET
DIMENSIONNEMENT:
ASSEMBLAGES COMPOSITES**

DIMENSIONNEMENT SIMPLIFIÉ DE REPARATIONS COMPOSITES COLLEES EN STEPPING : UNE ETUDE COMPARATIVE DE MODELES SEMI-ANALYTIQUES ET NUMERIQUES

JB. Orsatelli^{1,2}, E. Paroissien², F. Lachaud² et S. Schwartz²

1. DGA Techniques Aéronautiques, 47 rue Saint-Jean, CS 93123, 31131 Balma Cedex, France

2. Institut Clément Ader (ICA), Université de Toulouse, ISAE-SUPAERO, INSA, IMT MINES ALBI, UTIII, CNRS, 3 rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse, France

MOTS CLES : Méthode des éléments finis, macro-éléments, collage structural, zone cohésives

INTRODUCTION

Les réparations à fleur par collage structural des structures composites aéronautiques présentent un fort potentiel. Elles sont de type « scarf » (en biseau) ou de type « stepping » (en escalier) et permettent d'atteindre des hautes performances mécaniques sans nécessité de perçage ou d'ajout de fixations. Cependant, il n'existe pas de méthode standard de dimensionnement des joints collés. De nombreuses études ont démontré la possibilité de dimensionner des joints collés et des réparations à fleur par des méthodes analytiques, semi-analytiques ou éléments finis (EF). La discussion scientifique actuelle est tournée vers la comparaison du modèle 3D d'une réparation et du modèle 2D du joint collé équivalent (figure 1). C'est pourquoi les travaux présentés proposent une étude comparative de différents niveaux de modélisations d'une réparation composite en stepping.

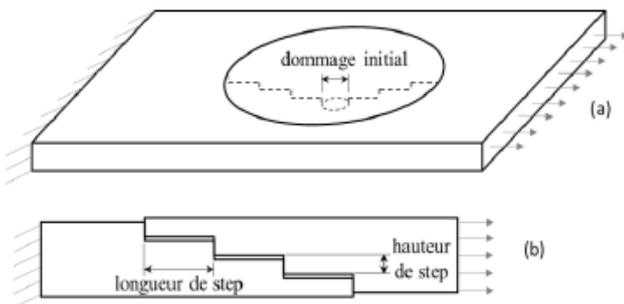


Figure 1: Réparation en stepping (a) et son joint collé équivalent (b).

MODELISATIONS PROPOSEES

Six modèles EF et macro-éléments (ME) ont été comparés : (i) joint 1D ME barre ; (ii) joint 1D ME poutre ; (iii) joint 2D EF déformations planes ; (iv) joint 2D EF déformations planes généralisées ; (v) joint 3D EF ; (vi) réparation 3D EF. Tous emploient des paramètres géométriques et matériaux identiques. Une gamme de longueurs de step et d'énergies de

fissuration de l'adhésif de réparation a été explorée afin de comparer les domaines de validité de chacun.

Les calculs EF ont été effectués en utilisant des zones cohésives pour modéliser l'adhésif. La modélisation par ME [1] présente un schéma de résolution associée à une modélisation simplifiée d'un recouvrement collé de type poutre sur fondation élastique. Elle supporte divers enrichissements comme la simulation de la fissuration par zone cohésive.

RESULTATS ET DISCUSSION

Une bonne cohérence entre les contraintes dans le joint collé a été observée entre les six modèles à l'exception du 1D-barre qui les sous-estime significativement. En termes d'effort maximum transmissible par le joint collé, le modèle 2D EF en déformations planes généralisées est celui qui approxime le mieux les résultats du modèle de EF 3D. Il est exempt des effets présents dans modèle du joint EF 3D, et ne voit pas ses raideurs modifiées par l'effet Poisson comme le modèle en déformations planes. Les modèles semi-analytiques donnent une estimation satisfaisante de l'effort transmissible qui est prédit par le modèle réparation EF 3D.

CONCLUSION

L'étude réalisée a confirmé que les contraintes dans la section la plus chargée d'une réparation en stepping sont égales à celles dans le joint équivalent à la réparation. Les modélisations simplifiées ME 1D-poutre et EF 2D sont proches du modèles complet 3D pour prédire l'effort transmissible d'une réparation avec des valeurs typiques d'énergie de fissuration de l'adhésif et de longueur de step.

Références

[1] E. Paroissien, F. Lachaud, S. Schwartz (2022) « Modelling load transfer in single-lap adhesively bonded and hybrid (bolted / bonded) joints », Prog Aerospace Sci; 130:100811.

MODELLING OF ADHESIVE FAILURE FOR CRASH

B. Bourel¹, F. Lauro¹, G. Haugou¹, N. Leconte^{1,2}

1. Univ. Polytechnique Hauts-de-France, CNRS, UMR 8201 - LAMIH, F-59313 Valenciennes, France

2. DMAS, ONERA, F-59014 Lille, France

MOTS CLES : Lightweight materials, Structural bonding, Fast dynamics strength and failure

INTRODUCTION

In order to achieve better fuel economy, the automotive industry is moving towards the use of lightweight materials, such as polymer/composites, in primary structural components. So, structural bonding often becomes an alternative solution to replace or to be added to traditional assemblies techniques.

However, the successful integration of bonding materials in automotive sector, and particularly for crash loading applications, requires a better understanding of their behaviour and failure mechanisms at different strain rates. The purpose of this work is to characterize the dynamic behaviour and to determine the failure criterion evolution of assembly bonded with a strain rate dependent adhesive. A viscoelastic-viscoplastic model in non-associative plasticity for the behaviour is used and identified with static and dynamic experimental tests [1-4]. A new modified Arcan device was then designed to obtain the average strain at failure under different loading angles and for loading speeds up to 300s⁻¹. This new device is inspired from the modified Arcan fixture developed by Cognard & Al for quasi-static loads [5]. The special feature of this new device falls within its low mass required to provide a “clean” dynamic loading, ie an effort measurement not disturbed by the system resonance [6]. To compensate the edge effects resulting in a stress concentration and so in an early failure initiation of the assembly, a “beak” has been designed on the substrates according to previous work done by ENSTA laboratory. For each loading angle and for each loading speed, the average strain at rupture is determined and reported in a “tensile strain - shear strain” graph. A Digital Image Correlation measurement was used to control the opening and the sliding displacements of the two substrates. The experimental results were then used to enrich the failure model of a specific cohesive element developed in [3]. This cohesive element takes into account the strain rate and pressure sensitivity of the crash adhesive. Finally, an industrial

part made of a composite omega beam closed by an aluminum plate

bonded joint is tested at various speeds (max 1,5m/s). The experimental results are then compared to the numerical ones and confirm the identification procedure and the modelling choices.

Références

- [1] D. Morin, G. Haugou, F. Lauro, B. Bennani, B. Bourel (2015). *Elasto-viscoplasticity Behaviour of a Structural Adhesive Under Compression Loadings at Low, Moderate and High Strain Rates*, Journal of dynamic behavior of materials, **1**, pp.124-135
- [2] V. Joudon, G. Portemont, F. Lauro, B. Bennani (2014). *Experimental procedure to characterize the mode I dynamic fracture toughness of advanced epoxy resins*. Engineering Fracture Mechanics, **126**, pp. 166–177.
- [3] R. Balieu, F. Lauro, B. Bennani, R. Delille, T. Matsumoto, E. Mottola (2013). *A fully coupled elastoviscoplastic damage model at finite strains for mineral filled semi-crystalline polymer*, International Journal of Plasticity, **51**, pp. 241-270
- [4] L. Dufour, B. Bourel, F. Lauro, G. Haugou, N. Leconte (2016). *A viscoelastic-viscoplastic model with non associative plasticity for the modelling of bonded joints at high strain rates*. International Journal of Adhesion & Adhesives, **70**, pp. 304-314
- [5] J.Y. Cognard, P.Davies, B.Gineste, L.Sohier (2005). *Development of an improved adhesive test method for composite assembly design*. Composites Science and Technology. **65**, pp. 359-368.
- [6] D. Morin, G. Haugou, B. Bennani, F. Lauro (2010). *Identification of a new failure criterion for toughened epoxy adhesive*, Engineering fracture mechanics **77**, pp. 3481-3500.

**SESSION 8: MODELISATION ET
DIMENSIONNEMENT: MODELES
SIMPLIFIES**

Bolt Sim : Idéalisation des assemblages boulonnés précontraints.

J.Abry, A. Collin, T. Kuntz, C. Mittelhaeuser, M. Shevtsova et D. Turlier

LOHR Industrie

MOTS CLES : Boulons, Modèle simplifié,

INTRODUCTION

L'objectif du projet est ambitieux, en effet, il couvre la validation d'un modèle simplifié d'un assemblage boulonné, l'automatisation de sa préparation géométrique et de son maillage et finalement le développement du post-traitement des résultats de calcul.

MODELE

Bolt sim est un modèle multi-éléments d'une liaison boulonnées avec la prise en compte d'une part de la vis par un élément poutre 1D, d'autre part de l'empilement des tôles assemblées maillées en éléments coques et liées par des éléments cohésifs représentatifs en géométrie et en raideur du cône de serrage.

Le contact radial de la vis avec le contour des trous de passage à chaque plan de joint est assuré par des éléments 1D de contact nœud à nœud. Afin d'alléger les temps de calcul un modèle sans prise en compte du frottement est développé et une raideur élastique permet de reproduire l'effort de frottement à vaincre pour atteindre le contact en cisaillement de bord de trou.

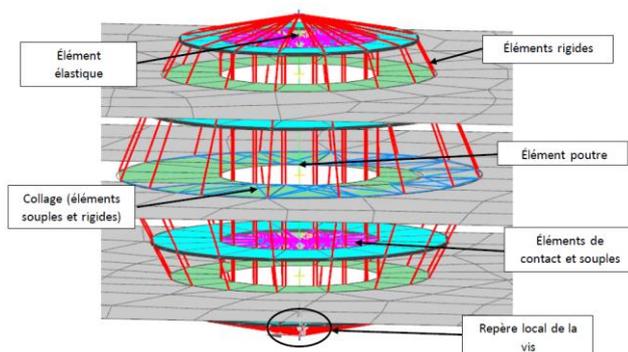


Figure 1: Modèle boltsim.

La validation du modèle proposé est réalisée par comparaison avec des modèles 3D détaillés et elle couvre des cas de chargement axiaux et des cas de chargement en cisaillement. Les limites du modèle seront énoncées.

IDEALISATION

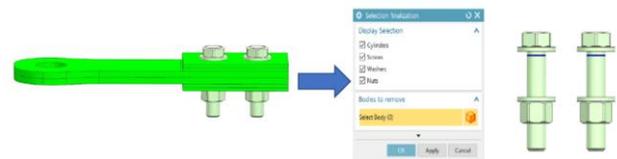


Figure 2: Recherche topologique.

L'automatisation de la construction du modèle est détaillée ; l'enrichissement fonctionnel de la géométrie, la création des points de liaison et des empreintes du cône de serrage. La programmation est possible grâce à l'API associée au logiciel de CAO et de maillage.

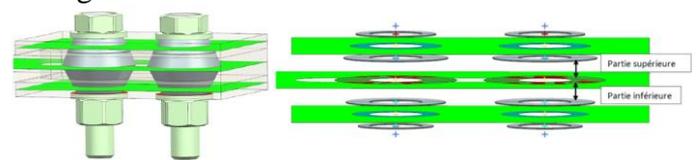


Figure 3: Cône de serrage et empreintes.

Lors de la construction, les paramètres de l'assemblage par défaut sont utilisés, l'utilisateur peut cependant renseigner le couple de serrage, le pas de filetage, la tolérance de serrage, les frottements sous tête de vis, du filetage et des surfaces d'appui des tôles assemblées.

La génération du modèle éléments finis avec tous les éléments de liaison est automatisée.

POST TRAITEMENT

Le post-traitement des résultats de calcul statique linéaire par éléments finis est présenté. L'analyse selon Eurocode3 est utilisée pour les charges exceptionnelles et celle de la norme NF-E-25-30-2 pour les charges de fatigue.

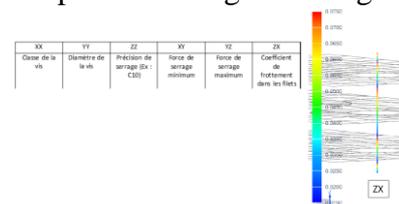


Figure 4: Affichage des résultats

ÉLABORATION D'UN MODÈLE DE CONNECTEUR POUR LA SIMULATION DYNAMIQUE D'ASSEMBLAGES BOULONNÉS

Q. Lançon¹, P.-A. Guidault¹, P.-A. Boucard¹ et N. Vallino²

1. Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS
LMPS – Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190, Gif-sur-Yvette, France

2. Safran Tech, Digital Sciences & Technologies Department, Rue des jeunes bois, Châteaufort, 78114 Magny-les-Hameaux, France

MOTS-CLÉS : Assemblages boulonnés, Dynamique rapide, Contact, Précharge, Plasticité, Modèle simplifié

INTRODUCTION

La simulation des assemblages boulonnés nécessite des stratégies de conception élaborées permettant une prise en compte fine des phénomènes spécifiques mis en jeu au sein des liaisons (contact, jeux, frottement, plasticité...). L'amélioration de la capacité de prédiction passe par des simulations numériques 3D d'assemblages comportant de nombreuses liaisons boulonnées, en particulier en dynamique rapide qui génèrent des coûts de calcul prohibitifs [1]. C'est dans ce contexte que nous proposons de développer une stratégie alternative utilisant un modèle simplifié à fort contenu mécanique représentatif de ces liaisons.

DESCRIPTION DU MODÈLE

Un premier modèle simplifié statique développé dans [2] a été implémenté sous la forme d'un élément utilisateur capable de s'implanter dans la plupart des codes de calcul commerciaux. Il a la particularité de s'appuyer sur des paramètres de conception bien maîtrisés tels que la précharge, le coefficient de frottement ou encore les dimensions du boulon. Il prend la forme d'un connecteur à 2 nœuds comme schématisé en Figure 1 relié à son environnement via des couplages cinématiques de type MPC classiquement disponibles dans ces codes.

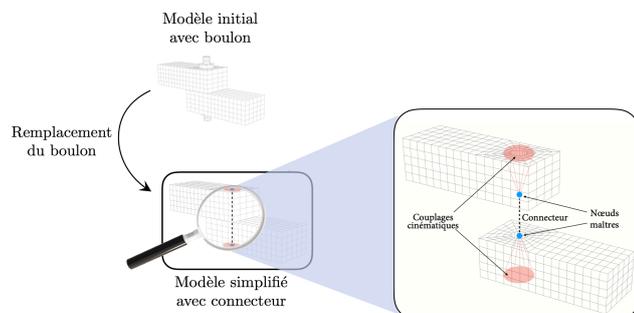


Figure 1: Démarche de remplacement.

Le comportement axial du connecteur inclut la prise en compte automatique de la précharge. Le comportement tangentiel modélise les divers phénomènes de frottement. Par ailleurs, la plasticité éventuelle au sein du boulon est également modélisée (voir Figure 2). L'idée est donc d'étendre ce modèle au cadre de la dynamique rapide, à savoir qu'il puisse s'intégrer dans des simulations de dynamique implicite et explicite et que les effets d'inertie liés à la masse soient pris en compte.

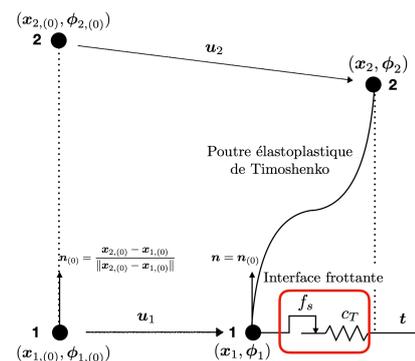


Figure 2 : Modèle de connecteur proposé.

CONCLUSION

Dans cette présentation, les performances du connecteur pour des simulations de dynamique rapide seront présentées. Des comparaisons entre simulations fines à l'échelle 3D et simulations avec des connecteurs seront également présentées.

Références

[1] M. Hadjoannou *et al.* (2016) « *Development and validation of bolted connection modeling in LS-DYNA for large vehicle models* », 14th International LS-DYNA Users Conference.

[2] R. Verwaerde *et al.* (2021) « *A non-linear finite element connector model with friction and plasticity for the simulation of bolted assemblies* », Finite Elements in Analysis and Design, volume (195).

