



Journées de présentation des travaux de thèse à mi-parcours des doctorants de l'Institut Clément Ader

Les 11 et 12 mai 2016

En l'amphi 4 de l'ISAE-SUPAERO

avec diffusion en streaming en direct sur

<http://video.isae.fr/livestream/amphi4>



Avant propos

L'objet de ce booklet est de recueillir les résumés des travaux de thèse (à mi-parcours) qui ont été présentés lors de la 1^{ère} édition des journées des doctorants de l'Institut Clément Ader. Le comité d'animation scientifique de l'ICA tient à remercier la direction de l'ISAE-SUPAERO pour son accueil et pour la mise à disposition de ses moyens techniques et humains (notamment notre collègue Marie Odile Monsu pour son accompagnement dans l'organisation et le déroulement de cette manifestation). Nous tenons particulièrement à remercier les jeunes doctorants pour la qualité de leur présentation et l'ensemble des membres de l'Institut Clément Ader pour leur participation active à ces exposés.

Pour le comité d'animation scientifique de l'ICA

Francis Collombet et Christian Gogu

Table des matières

Programme des journées	4
Pierre Planques. Etude et modélisation de l'écaillage d'une barrière thermique sur une pièce de turbomoteur.	8
Mahmoud Harzallah. Modélisation du comportement des alliages de titane en coupe orthogonale.	10
Romeu Gomes. Compréhension des mécanismes de dégradation des outils de découpage à chaud de tôles d'acier trempant au Bore-Manganèse.	12
Aurélien Mondière. Étude de la microstructure de l'alliage aéronautique Ferrium M54.	14
Cesar Moises Sanchez Camargo. Caractérisation du comportement des produits minces par nanoindentation.	16
Maxime Rollin. Etude et optimisation des conditions de refroidissement de pièces SPF.	18
Quentin Sirvin. Etude du comportement mécanique de tôles en alliage de titane et des paramètres procédés dans les opérations de formage à chaud.	20
Thibaut Paccou. Evalueur technologique pour l'étude de la tenue au souffle d'un fuselage composite : de l'influence du processus de fabrication à l'évaluation de sa tenue résiduelle.	22
Léonard Serrano. Systèmes Epoxy – Cuisson basse température.	24
Julien Patou. Elaboration de pièces composites aéronautiques complexes à partir de préformes textiles thermoplastiques et consolidation en autoclave.	26
Céline Vicard. Mise en œuvre de composites thermoplastiques par voie liquide réactive : expérimentation et modélisation.	28
Lilian Martineau. Formage de composites thermoplastiques épais par emboutissage.	30
Florian Mitjana. Optimisation topologique de structures aéronautiques élancées ou minces.	32
Iman Alhossen. Propagation Inverse d'Incertitudes, Applications en Génie Mécanique.	34
Florian Sanchez. Modèles thermiques pour la conception préliminaire d'actionneurs et de systèmes électriques.	36
Rémi Thanwerdas. Amélioration des méthodes de prédiction du glissement de liaisons vissées dû à des chargements vibratoires et thermoélastiques.	38
Donghai Qiu. Développement de ressort non linéaire pour le pompage énergétique.	40
Ankit Chiplunkar. Apprentissage statistique pour l'estimation de charges limites en manoeuvre.	42
Elisa Bosco. Compréhension d'un phénomène d'instabilité aéroélastique : Application aux carénages de guide de volet hypersustentateur d'un avion soumis à des excitations aérodynamiques produites par le flux d'un turboréacteur.	44
Pierre-Louis Chiambaretto. Modèle de réservoir cryotechnique de lanceur : définition d'un méta-matériau équivalent.	46
Imen Yahyaoui. Etude par émission acoustique de l'endommagement des structures multi-matériaux à base de bois.	48
Hang Li. Utilisation de matériaux bois intelligents pour la gestion durable des infrastructures.	50
Juan de Dios Rodriguez Ramirez. Failure mode maps des Inserts dans les structures sandwichs.	52
Guillaume Androuin. Propagation de délaminage sous spectre de charge vibratoire.	54
Nicolas Dubary. Optimisation Numérique et Expérimentale de la Tolérance aux Dommages d'Impact d'un Stratifié Composite Aéronautique.	56
Benjamin Vales. Développement d'un essai ARCAN dynamique.	58

Programme des journées

Mercredi 11 mai - matin		
Session 1 : Surfaces, Usinages, Matériaux et Outillages		
Jury : Francis Collombet (président), Denis Delagnes, Gilles Dusserre, Yann Landon, Yannick Le Maout, Catherine Mabru, Thomas Pottier, Vincent Velay, Vanessa Vidal		
Horaires	Doctorant. Sujet de thèse.	Equipe encadrante
9 : 00 - 9 : 20	Pierre Planques. Etude et modélisation de l'écaillage d'une barrière thermique sur une pièce de turbomoteur.	B. Viguier (CIRIMAT), V. Vidal, P. Lours, J. Huez (CIRIMAT), V. Proton (Turboméca)
9 : 20 - 9 : 40	Mahmoud Harzallah. Modélisation du comportement des alliages de titane en coupe orthogonale.	Y. Landon, T. Pottier, J. Senatore, M. Mousseigne
9 : 40 - 10 : 00	Romeu Gomes. Compréhension des mécanismes de dégradation des outils de découpage à chaud de tôles d'acier trempant au Bore-Manganèse.	L. Penazzi, C. Boher
10 : 00 - 10 : 20	Aurélien Mondière. Étude de la microstructure de l'alliage aéronautique Ferrium M54.	D. Delagnes
10 : 20 - 10 : 40	Pause café	
10 : 40 - 11 : 00	Cesar Moises Sanchez Camargo. Caractérisation du comportement des produits minces par nanoindentation.	C. Mabru, A. Hor
11 : 00 - 11 : 20 PRESENTATION CONFIDENTIELLE	Maxime Rollin. Etude et optimisation des conditions de refroidissement de pièces SPF.	L. Penazzi, V. Velay, T. Sentenac, T. Pottier
11 : 20 - 11 : 40 PRESENTATION CONFIDENTIELLE	Quentin Sirvin. Etude du comportement mécanique de tôles en alliage de titane et des paramètres procédés dans les opérations de formage à chaud.	L. Penazzi, V. Velay
11 : 40 - 14 : 00	Délibération du jury et buffet	

N.B. : Les présentations marquées confidentielles ne pourront être suivies que sur place et ne seront pas retransmises en streaming

Journées de présentation des travaux de thèse à mi-parcours, 11-12 mai 2016

<http://www.institut-clement-ader.org>

Mercredi 11 mai – après-midi		
Session 2 : Matériaux, Propriétés et Procédés des Composites		
Jury : Francis Collombet (président), Gérard Bernhart, Stéphane Colin, Laurent Crouzeix, Olivier De Almeida, Anis Hor, Philippe Olivier, Jean Noël Périé		
Horaires	Doctorant. Sujet de thèse.	Equipe encadrante
14 : 00 - 14 : 20	Thibaut Paccou. Evalueur technologique pour l'étude de la tenue au souffle d'un fuselage composite : de l'influence du processus de fabrication à l'évaluation de sa tenue résiduelle.	F. Collombet, L. Crouzeix, R. Zitoun, B. Douchin, A. Rouquand (CEA), Y.-H. Grunevald (CES)
14 : 20 - 14 : 40	Léonard Serrano. Systèmes Epoxy – Cuisson basse température.	P. Olivier
14 : 40 - 15 : 00	Julien Patou. Elaboration de pièces composites aéronautiques complexes à partir de préformes textiles thermoplastiques et consolidation en autoclave.	G. Bernhart, E. De Luycker
15 : 00 - 15 : 20	Pause café	
15 : 20 - 15 : 40	Céline Vicard. Mise en œuvre de composites thermoplastiques par voie liquide réactive : expérimentation et modélisation.	G. Bernhart, A. Cantarel, O. De Almeida
15 : 40 - 16 : 00	Lilian Martineau. Formage de composites thermoplastiques épais par emboutissage.	G. Bernhart, F. Chabert (ENIT), T. Djilali (Nimitech)
16 : 00 - 16 : 20	Délibération du jury	

Jeudi 12 mai – matin		
Session 3 : Modélisation des Systèmes et Microsystèmes		
Jury : Christian Gogu (président), Marc Budinger, Alain Daidié, Xiaojing Gong, Joseph Morlier, Manuel Paredes		
Horaires	Doctorant. Sujet de thèse.	Equipe encadrante
9 : 00 - 9 : 20	Florian Mitjana. Optimisation topologique de structures aéronautiques élancées ou minces.	S. Cafieri (ENAC), F. Bugarin, C. Bes, C. Gogu, M. Mongeau (ENAC), F. Castanié (Avantis)
9 : 20 - 9 : 40	Iman Alhossen. Propagation Inverse d'Incertitudes, Applications en Génie Mécanique.	S. Segonds, F. Bugarin
9 : 40 - 10 : 00	Florian Sanchez. Modèles thermiques pour la conception préliminaire d'actionneurs et de systèmes électriques.	M. Budinger, I. Hazyuk
10 : 00 - 10 : 20	Rémi Thanwerdas. Amélioration des méthodes de prédiction du glissement de liaisons vissées dû à des chargements vibratoires et thermoélastiques.	A. Daidié, E. Rodriguez
10 : 20 - 10 : 40	Pause café	
10 : 40 - 11 : 00	Donghai Qiu. Développement de ressort non linéaire pour le pompage énergétique.	M. Paredes, S. Seguy
11 : 00 - 11 : 20	Ankit Chiplunkar. Apprentissage statistique pour l'estimation de charges limites en manoeuvre.	J. Morlier, E. Rachelson (ISAE-SUPAERO)
11 : 20 - 11 : 40	Elisa Bosco. Compréhension d'un phénomène d'instabilité aéroélastique : Application aux carénages de guide de volet hypersustentateur d'un avion soumis à des excitations aérodynamiques produites par le flux d'un turboréacteur.	J. Morlier, N. Gourdain (ISAE-SUPAERO)
11 : 40 - 12 : 00	Pierre-Louis Chiambaretto. Modèle de réservoir cryotechnique de lanceur : définition d'un méta-matériau équivalent.	P. Villedieu (ONERA), M. Charlotte
12 : 00 – 14 : 00	Délibération du jury et buffet	

Jeudi 12 mai - après-midi		
Session 4 : Structures, Impact, Modélisation, Usinage des Composites Métrologie, Identification, Contrôle et Surveillance*		
Jury : Xiaojing Gong (présidente), Steven Marguet, Marianne Perrin, Jean-Noel Périé, Samuel Rivallant		
Horaires	Doctorant. Sujet de thèse.	Equipe encadrante
14 : 00 - 14 : 20	Imen Yahyaoui. Etude par émission acoustique de l'endommagement des structures multi-matériaux à base de bois.*	M. Perrin, X. Gong
14 : 20 - 14 : 40	Hang Li. Utilisation de matériaux bois intelligents pour la gestion durable des infrastructures.*	M. Perrin, F. Eyma, X. Jacob (PHASE), V. Gibiat (PHASE)
14 : 40 - 15 : 00	Juan de Dios Rodriguez Ramirez. Failure mode maps des Inserts dans les structures sandwichs.	B. Castanié, C. Bouvet
15 : 00 - 15 : 20	Guillaume Androuin. Propagation de délaminage sous spectre de charge vibratoire.	L. Michel, I. Maillet (DGA)
15 : 20 - 15 : 40	Pause café	
15 : 40 - 16 : 00	Nicolas Dubary. Optimisation Numérique et Expérimentale de la Tolérance aux Dommages d'Impact d'un Stratifié Composite Aéronautique.	C. Bouvet, S. Rivallant, L. Ratsifandrihana (Segula Technologies)
16 : 00 - 16 : 20 PRESENTATION CONFIDENTIELLE	Benjamin Vales. Développement d'un essai ARCAN dynamique.	S. Marguet, J.-F. Ferrero, P. Navarro
16 : 20 - 16 : 40	Délibération du jury	

N.B. : Les présentations marquées confidentielles ne pourront être suivies que sur place et ne seront pas retransmises en streaming

Étude et modélisation de l'écaillage d'une barrière thermique sur une pièce de turbomoteur

Doctorant : Pierre PLANQUES¹

Encadrants : Vanessa VIDAL² (ICA), Philippe LOURS³ (ICA), Julitte HUEZ⁴ (CIRIMAT), Bernard VIGUIER⁵ (CIRIMAT), Vincent PROTON (TURBOMECA), Fabrice CRABOS (TURBOMECA)

¹ pierre.planques@ensiacet.fr

² vanessa.vidal@mines-albi.fr, ³ philippe.lours@mines-albi.fr, ⁴ julitte.huez@ensiacet.fr, ⁵ bernard.viguiet@ensiacet.fr

Résumé — L'actuel état de l'art des barrières thermiques (BT) APS consiste en un système bicouche composé d'une couche de liaison MCrAlY de 150 µm d'épaisseur et d'un revêtement céramique de ZrO₂-8%Y₂O₃ de 250-500 µm d'épaisseur. Cependant, à cause des refroidissements successifs liés aux cycles thermomécaniques imposés au moteur, les différences de coefficients de dilatation thermique entre le substrat métallique et la couche de céramique entraîne de la fatigue thermomécanique conduisant à une détérioration progressive et irréversible du dépôt. La compréhension de ces phénomènes d'écaillage et la prédiction de la durée de vie des BT sont des enjeux majeurs pour les motoristes qui souhaitent élaborer un modèle pertinent de durée de vie.

Abstract — The current state of the art of APS TBC consists in a bilayer system composed by a 150 µm thick MCrAlY bond coat and a 250-500 µm thick ceramic top coat of ZrO₂-8%Y₂O₃. However, following cumulative cooling related to successive thermo-mechanical cycles imposed to the engine, the thermal expansion misfit between the metallic substrate and the ceramic layer results in thermomechanical fatigue leading to a progressive and irreversible damage of the deposit. Consequently, understanding such spalling phenomena and predicting the life of the thermal barriers are major issues for engine-makers willing to build and properly implement a relevant model of life to be used for design purpose.

Contexte, avancements et perspectives

Les revêtements barrières thermiques projetées par plasma atmosphérique (BT APS) sont largement utilisés dans les sections chaudes des turbines à gaz comme systèmes d'isolation thermique. L'actuel état de l'art des BT APS est un système bicouche composé d'une couche de liaison de 150 µm d'épaisseur MCrAlY et d'un revêtement céramique de 250-500 µm d'épaisseur en zircone ZrO₂ partiellement stabilisée avec 7-8wt% d'Yttrine Y₂O₃. Cependant, à cause des refroidissements successifs liés aux cycles thermomécaniques imposés au moteur, les différences de coefficients de dilatation thermique entre le substrat métallique et la couche de céramique entraîne de la fatigue thermomécanique conduisant à une détérioration progressive et irréversible du dépôt. La compréhension de ces phénomènes d'écaillage et la prédiction de la durée de vie des BT sont des enjeux majeurs pour les motoristes qui souhaitent élaborer un modèle pertinent de durée de vie utilisable à des fins de conception. Cela nécessite au préalable une connaissance précise des propriétés des matériaux du système et de leurs évolutions, ainsi que des modes d'endommagement de ces revêtements.

Les propriétés thermo-physiques et mécaniques des revêtements barrières thermiques plasma sont fortement dépendantes de la microstructure, et par conséquent des paramètres de projection utilisés dans le procédé. Un grand nombre de données publiées dans la littérature [1-5], ont été collectés et comparés, et mis au regard des paramètres de dépôt et/ou des méthodes de mesure. Deux microstructures sont comparées : une microstructure lamellaire standard, poreuse et micro-fissurée

(classiquement obtenues par projection plasma), et une microstructure verticalement macro-fissurée d'épaisseur (1 mm).

Une des principales difficultés de ce sujet réside dans la grande dispersion des résultats, que ce soit en termes de durée de vie, mais aussi et surtout de propriétés, mécaniques et physiques, même pour une procédure d'élaboration donnée et fixe. Cette dispersion dépend fortement des méthodes de mesure, mais aussi - pour une méthode donnée - de l'étude expérimentale considérée. Le tableau 1 présente un résumé des propriétés des revêtements de BT extrait à partir d'une revue de la littérature, ne se limitant pas aux références citées [1-5]. Malgré la dispersion importante, des tendances générales ont pu être données reliant propriétés, microstructure et paramètres de procédé. L'étude de ces propriétés et leurs évolutions au cours du vieillissement (cyclage, température, oxygène, humidité, contraintes...) est en cours pour confirmer et compléter ces résultats.

Table 1- properties of APS TBC, compared with dense zirconia

Properties	Plasma Thermal Barrier Coating	Vertically-cracked Plasma Thermal Barrier Coating	Dense Zirconia
Density (g/cm ³)	5.3	5.5	6.05
Coefficient of Thermal Expansion (10 ⁻⁶ K ⁻¹) [domain 20-1000°C]	9	9 to 10	10.3
Thermal Conductivity (W/mK) [domain 20-1000°C]	0.6 to 1	1.3 to 1.6	2.2 to 2.8
Young Modulus (GPa)	10 in bending test 13 in tension 25 in compression 37 by dynamic measurement 60 to 150 by indentation test	2 to 4 in tension 4 to 8 in compression 15 to 25 by dynamic measurement >80 by indentation test	205 by dynamic measurement (Impulse-Excitation-Technique)
Strength (MPa)	13 in tension 33 in bending test 300 in compression	7 in tension 15 in bending-compression	350 in tension 1 000 in bending test 6 000 in compression
Poisson Coefficient	0.04 to 0.18 by compression	0.03 by compression	0.23 to 0.33
Fracture Toughness (MPa√m)	<u>Mode I:</u> 1 to 1.2 in SEVNB* 1.8 to 2.2 by indentation test and DCB** <u>Mode II:</u> 0.7 in SEVNB*	<u>Mode I:</u> 3 to 4 in DCB 4 to 5 by indentation test	<u>Mode I:</u> 9.5
Hardness (GPa)	3 to 7	9	>10 (>1350 HV)
Residual Stresses (MPa)	45 to 65	30 to 55	

*SEVNB: Single Edge V-Notched Beam

**DCB: Double Cantilever Bending

Références bibliographiques

1. H. GUO, H. MURAKAMI, S. KURODA, *Mater. Trans.*, 46 (2005), 1775-1778.
2. R. VAßEN, A. STUKE, D. STÖVER, *J. Therm. Spray Technol.*, 18 (2009), 181-186.
3. D. SCHWINGEL et al., *Surf. & Coat. Technol.*, 108-109 (1998), 99-106.
4. S. CHOI, D. ZHU, R. MILLER, *Proceed. 28th Ann. Intern. Conf. & Expo. Adv. Ceram. & Compos.*, Cocoa Beach, Florida, January 25-30, (2004).
5. J. A. THOMPSON, T. W. CLYNE, *Acta Mater.*, 49 (2001), 1565-1575.

ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES ALLIAGES DE TITANE EN COUPE ORTHOGONALE

Doctorant : Mahmoud HARZALLAH¹

Encadrants : Yann LANDON², Thomas POTTIER³

¹ mahmoud.harzallah@mines-albi.fr

² yann.landon@univ-tlse3.fr, ³ thomas.pottier@mines-albi.fr

Résumé — L'approche scientifique de cette thèse a pour objectif principal de vérifier la validité des modèles de comportement du matériau et des interactions tribologiques, à partir de mesures in situ, du processus de formation du copeau. Cela se traduit par la mise en place de mesures sans contact des champs de déformation et de température en pointe d'outil. Parallèlement, une partie numérique sera orientée vers l'élaboration d'un modèle tridimensionnel de coupe orthogonal permettant la confrontation modèle/expérience. Ceci permettra de tester la validité des lois d'endommagement et de comportement qui devront être identifiées de manière adéquate.

Abstract — The main objective of the scientific approach in this thesis is to verify and validate the constitutive models of the material and the tribological interactions, from in situ measurements, of the chip formation process. This can be seen by setting up of full field measurement of strain and temperature at the tool tip. Meanwhile, a three dimensional FE model of orthogonal cutting will be developed for comparison with experimental results. This will test the validity of various damage and constitutive laws that must be properly identified.

1. Analyse expérimentale de la coupe

L'évolution des exigences dans le domaine d'usinage nécessite d'intensifier la recherche et le développement afin d'appréhender les mécanismes physiques mis en jeu durant le processus d'enlèvement de la matière.

Bien qu'il soit l'un des procédés de fabrication les plus exploités, l'usinage des métaux et plus particulièrement les alliages de titane, ne fait pas encore l'objet de modélisations prédictives fiables. Ceci est principalement lié à la complexité des phénomènes qu'il implique, à la fois mécaniques, thermiques et physio-chimiques.

Cependant, modéliser une opération d'usinage passe essentiellement par l'observation et la compréhension, à plusieurs échelles, des mécanismes de formation du copeau. C'est dans ce contexte qu'un banc d'essai « **VISIR** » est mis place et équipé par une caméra rapide et une autre infrarouge afin de visualiser simultanément le champ de déformation par imagerie rapide et le profil de température. La combinaison de deux techniques offre la possibilité d'analyser rigoureusement les mécanismes qui interviennent lors de la formation de copeau et d'apporter une contribution sur la compréhension de la coupe. Basé sur cette démarche, des essais préliminaires en coupe orthogonale ont été réalisés à l'aide de la machine « **DEXTER** » qui offre d'avantage un bon espace pour permettre une instrumentation à l'observation in-situ de processus de formation de copeau. Des outils de coupe en carbure de tungstène ont été testés pour des différents angles de coupe $[-15^{\circ}, 0^{\circ}, 15^{\circ}]$ afin d'analyser son influence sur les mécanismes de formation de la matière.

2. Rhéologie du matériau usiné et simulation numérique de la coupe

Suite aux observations expérimentales, l'étude s'est portée aussi, sur une caractérisation en **ex-situ** du comportement d'alliage de titane Ti-6Al-4V sous sollicitations dynamiques équivalentes à ceux rencontré en usinage. La caractérisation dans ce cas s'est fixée, sur des essais en cisaillement dynamique sur La machine **GLEEBLE** et à travers des éprouvettes en chapeau qui ont été jugé apte à reproduire les mêmes phénomènes observés dans la zone de cisaillement primaire. Les essais ont été réalisés pour des vitesses de déformations allons jusqu'à 10^3 s^{-1} et des températures qui montent jusqu'à 900°C .

Cependant, les résultats expérimentaux ont révélés, implicitement, la sensibilité des paramètres physiques, éventuellement la limite d'élasticité et les paramètres d'écrouissage, à la température et à la vitesse de déformation. En accord avec cette philosophie et suite aux formes particulières des courbes à dépouiller, il paraissait nécessaire de mettre en place une formulation qui tient compte des phénomènes abordés. A ce stade, Une nouvelle formulation simple (**Eq.1**) basée sur la loi de Ludwick a été retenu toute en attribuant aux paramètres A, B et n un couplage fort tant à la température "T" qu'à la vitesse de déformation " $\dot{\epsilon}$ ".

$$\sigma = A(\dot{\epsilon}, T) + B(\dot{\epsilon}, T) \cdot \epsilon^{n(\dot{\epsilon}, T)} \quad (1)$$

Un dépouillement numérique par méthode inverse basé sur un modèle axisymétrique d'éprouvette chapeau en élément finis a été mis en place afin de décrire l'évolution de ces paramètres.

L'étude et la modélisation d'une opération d'usinage aborde donc un problème très complexe, fortement couplés, faisant intervenir aussi la mécanique de la rupture et la thermique dans des conditions extrêmes. Couplé à l'évolution de la loi du comportement, un nouveau modèle d'endommagement inspiré du critère "*Max Shear*" [1] est élaboré afin d'assurer une retranscription fidèle tant aux mécanismes d'enlèvement de la matière qu'à la formation du copeau (**Eq.2**).

$$\epsilon_f = \left[\left[\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{B(T, \dot{\epsilon})}{C_2(T, \dot{\epsilon})} \cos\left(\frac{\pi\bar{\theta}}{6}\right) \right]^{-1} - \frac{A(T, \dot{\epsilon})}{B(T, \dot{\epsilon})} \right]^{\frac{1}{n(T, \dot{\epsilon})}} + \frac{d}{2} \left[1 + \tanh\left(2\pi \frac{T - T_s}{T_s}\right) \right] \quad (2)$$

Le couplage est assuré dans le premier terme à travers les paramètres $A(\dot{\epsilon}, T)$, $B(T, \dot{\epsilon})$ et $n(\dot{\epsilon}, T)$ de la loi de comportement. Le paramètre $\bar{\theta}$ représente l'angle de lode normalisé alors que $C_2(T, \dot{\epsilon})$, d et T_s sont les paramètres à identifier. Suite aux observations expérimentales, le deuxième terme a été rajouté afin de décrire l'évolution de l'adoucissement thermique à haute température. En effet, il permet d'atténuer d'une manière phénoménologique l'effet de l'écrouissage tout en produisant un fort adoucissement de la contrainte due à l'élévation de la température.

Après les avoir implémentées avec succès dans une routine **USER_Material** du code élément-finis **IMPETUS**, un modèle tridimensionnel et en coupe orthogonale a été développé afin de simuler l'opération d'usinage de l'alliage de titane Ti-6Al-4V. L'outil est modélisé par une loi thermoélastique alors que la pièce est modélisée par les deux lois décrites auparavant à travers les équations (1) et (2). Afin de définir les interactions Outil/matière, une loi du frottement dépendante de la vitesse de glissement a été implémentée. Les résultats préliminaires du modèle semblent en concordance avec les observations expérimentales et des comparaisons entre les deux volets de la thèse en terme fréquence du festonnage, effort de coupe, champs de déformation et de température sont encore à produire.

Références

- [1] Tomasz Wierzbicki, Yingbin Bao, Young-Woong Lee, Yuanli Bai Calibration and evaluation of seven fracture models, International Journal of Mechanical Sciences 47 (2005) 719–743

Compréhension des mécanismes de dégradations des outils de découpage à chaud de tôles d'acier trempant au bore-manganèse

Doctorant : Romeu GOMES¹

Encadrants : Luc PENAZZI², Christine BOHER³,

¹ romeu.gomes@mines-albi.fr

² luc.penazzi@mines-albi.fr, ³ christine.boher@mines-albi.fr

Résumé — Les tôles en acier 22MnB5 à haute résistance mécanique (1500 MPa) permettent aux constructeurs automobiles de diminuer la masse des véhicules. L'emboutissage à chaud diminue les efforts de presse mais nécessite une trempe dans l'outillage pour atteindre les résistances mécaniques souhaitées. L'introduction d'une fonction de cisailage à chaud est un moyen pour diminuer les coûts de production. Les fortes contraintes thermo-mécaniques induites dans lames conduisent à des dégradations sévères. L'objectif de la thèse est de comprendre quels sont leur mécanismes d'endommagement et d'optimiser l'opération de cisailage à chaud.

Abstract — Using 22MnB5 ultra high strength steel (1500 MPa) is making possible to achieve weight savings in automotive industries. Hot stamping reduces presses force but quenching in tools is needed to reach the wanted mechanical strength. The introduction of a hot blanking function is a way to reduce production costs. The high thermo-mechanical stresses in blades may lead to severe wear. The aim of this thesis is to understand what are the damage mechanism of the blades and to optimize the blanking operation.

1. Contexte, problématique, objectifs

La production de pièces des structures automobiles par emboutissage à chaud pousse les constructeurs automobiles à une réflexion sur la réduction des coûts de fabrication. Le procédé d'emboutissage à chaud est divisé en trois étapes [1]. La tôle est chauffée à la température d'austénitisation (environ 900°C), puis formée avec une trempe dans les outillages et finalement détournée. Après la trempe, la tôle présente une microstructure martensitique qui lui confère une très haute limite d'élasticité (1500 MPa). Trois méthodes de détournage sont rencontrées. Le détournage laser, le détournage mécanique à froid après trempe, le détournage à chaud. Le détournage laser est une opération de découpe sans contact mais avec un temps de cycle peu compatible avec des cadences de grandes séries. Le détournage mécanique à froid est rapide mais il est exclu car les sollicitations mécaniques dans les lames sont intenses ce qui provoque des usures rapides. Le détournage à chaud, au-dessus de la température de transformation martensitique de la tôle (400 °C) réduirait l'effort de cisailage et donc la sollicitation mécanique des lames [2]. Néanmoins, l'aspect thermique du problème est aussi une source d'endommagement [3]. L'objectif de la thèse est donc de comprendre les mécanismes de dégradation des lames de cisailage à chaud et leurs cinétiques. Pour cela, une double approche expérimentale et numérique par la méthode des éléments finis est développée.

2. Essais de cisailage à chaud menés sur le pilote MEFISTO

Des essais de cisailage à chaud sont développés sur le module de découpage du pilote MEFISTO (Figure 1). La machine d'essais permet d'évaluer les effets de trois paramètres : le jeu entre les lames supérieure et inférieure, la température initiale de la tôle et le matériau d'outil. Des découpes en cadences sont réalisées afin d'observer les mécanismes de dégradation. Les premières constatations d'endommagement montrent que des particules issues de la tôle sont transférées sur les lames. De plus, des plastifications en sous couche qui conduisent à des fissurations et donc à la production de particules d'usure sont observées au niveau de l'arête de coupe (Figure 2). Des mesures d'effort de

coupe, de déplacement, de températures et de la géométrie du bord découpé permettent d'évaluer l'état d'usure de la lame. Elles sont comparées aux résultats d'un modèle éléments finis du cisailage.

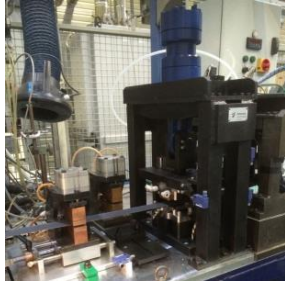


Figure 1 – Vue du module de cisailage MEFISTO

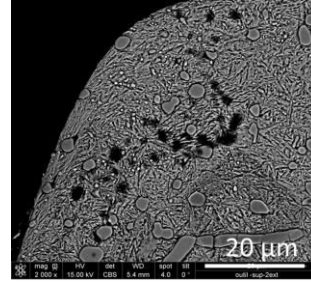


Figure 2 – Vue en coupe au microscope électronique à balayage de l'arête de coupe d'une lame

3. Modélisation éléments finis du cisailage à chaud

Nous proposons un modèle éléments finis de l'opération de cisailage à chaud du 22MnB5 à haute température. La modélisation du couplage thermo-mécanique faible est complexe de par la dépendance en température des comportements mécaniques et thermique. Dans le cas d'une tôle à 850 °C avec un jeu de 12 %, l'évolution de l'effort de coupe est en accord avec la mesure (Figure 3) et montre des valeurs atteignant 320 N/mm. On observe également, au niveau de l'arête de coupe, des contraintes mécaniques de 700 MPa (Figure 3) et un échauffement en surface de 130 °C sur un cycle à un temps de 0.15 s (Figure 4). Ces niveaux de contraintes et de températures justifient les observations de dégradations sur les lames ayant subies quelques dizaines de cycles de cisailage.

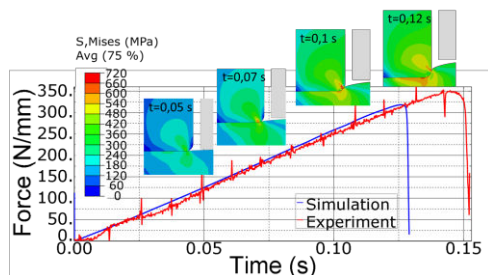


Figure 3 – Comparaison de l'évolution de l'effort de coupe en fonction du temps simulé et expérimental

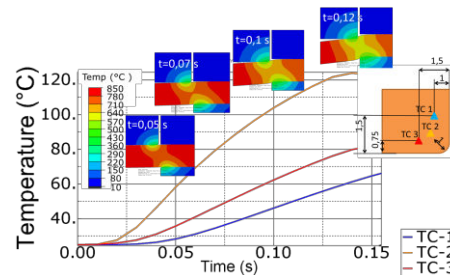


Figure 4 – Estimation de la température à différentes profondeurs de la lame

4. Conclusions et perspectives

Les essais de cisailage à chaud permettent de suivre des indicateurs macroscopiques de l'usure des lames. Une modélisation éléments finis du cisailage à chaud permet d'estimer les niveaux contraintes thermo mécaniques que subissent les lames et ainsi expliquer les dégradations observées sur des vues en coupe. Les perspectives sont de mener des essais en cadence pour tester l'effet du jeu et de la température initiale de la tôle sur les mécanismes de dégradation et de proposer un modèle thermomécanique cyclé de l'opération de cisailage.

Références

- [1] [H. Karbassian, et al. A review on hot stamping, *J of Mat Process Techno*, 210, 2103-2118, 2010.](#)
- [2] [H. So. et al. An investigation of the hot blanking process of the quenchable boron alloyed steel 22MnB5 before and after hot stamping process, *J of Mat Process Techno*, 212, 437-449, 2012.](#)
- [3] [H. Torres. et al. Hot shearing processes: correlation of numerical simulation with real wear phenomena, *Tribology International*, 82, 514-524, 2015.](#)

Etude de la microstructure de l'alliage aéronautique Ferrium® M54™-Liens avec les propriétés mécaniques

Doctorant : Aurélien MONDIERE

Encadrants : Denis DELAGNES

¹ aurelien.mondiere@mines-albi.fr

² delagnes@mines-albi.fr

Résumé — Le Ferrium® M54™ est un acier très haute performance dont le compromis $R_m/K_{IC}/K_{ISCC}$ et le coût le rendent très intéressant pour des applications aéronautiques. Cependant, les connaissances actuelles de sa microstructure ne permettent pas d'expliquer ses excellentes propriétés. Le traitement thermique joue un rôle prépondérant sur la microstructure obtenue et les propriétés. Les différentes étapes seront décomposées et la structure multi-échelles analysées de façon à comprendre les mécanismes microstructuraux mis en jeu et de stabiliser et optimiser dans le futur le compromis $R_m/K_{IC}/K_{ISCC}$.

Abstract — Ferrium® M54™ is a very high performance steel with excellent $UTS/K_{IC}/K_{ISCC}$ compromise and cost which interest aeronautical industry. However, the actual knowledge about its microstructure do not explain its excellent properties. The heat treatment plays a major role on the obtained microstructure and properties. The different steps will be decomposed and the multiscale structure analyzed to understand the microstructural mechanisms which take place and to stabilize and optimize in the future the compromise $UTS/K_{IC}/K_{ISCC}$.

1. Introduction

Le Ferrium® M54™ a été développé sur la base de l'Aermet® 100 par QuesTek en optimisant sa composition par la méthode CALPHAD [1]. Le M54 est ainsi moins coûteux à élaborer en raison d'un taux de cobalt réduit (voir *Tableau 1*) mais ses propriétés sont identiques à l'Aermet® 100, voire meilleure pour le K_{ISCC} (voir

Tableau 2). Ce paramètre est très important pour les applications aéronautiques [2] et notamment pour les trains d'atterrissages qui sont soumis aux agressions du milieu extérieur. QuesTek a ainsi déposé le brevet de l'acier M54 tout en publiant des recommandations de traitement thermique (TTh) très spécifiques [3]. Messier-Bugatti-Dowty (MBD), partenaire et instigateur du projet, a réalisé plusieurs TTh sur le M54 dont certains conduisent à une perte de $R_{p0,2\%}$ d'environ 100MPa et une chute du K_{ISCC} sans que la résistance mécanique à la traction et la ténacité ne soient atteintes.

Tableau 1: Composition chimique (%massique) du M54 et de l'Aermet 100

Nuance	C	Cr	Ni	Co	Mo	W	V
M54	0.3	1	10	7	2	1.3	0.1
Aermet® 100	0.23	3.1	11.1	13.4	1.2	/	/

Tableau 2: Propriétés mécaniques du M54 et de l'Aermet 100

Nuance	R_m (MPa)	$R_{p0,2\%}$ (MPa)	K_{IC} (MPa \sqrt{m})	K_{ISCC} (MPa \sqrt{m})
M54	≥ 1965	≥ 1655	≥ 110	≥ 40
Aermet® 100	≥ 1930	≥ 1655	≥ 110	≥ 24

Dans ce cadre-là, de nombreuses interrogations sont apparues notamment sur les préconisations de QuesTek. Un palier à 315°C à l'austénitisation est fortement recommandé pour minimiser la formation de carbures indésirables qu'il serait difficile de remettre en solution et une vitesse de chauffage la plus élevée possible, lors de la même étape, pour éviter le grossissement de ces carbures indésirables. Ces deux préconisations sortent des « standards » industriels et d'autres parts il n'existe aucune certitude

expérimentale montrant l'intérêt de telles contraintes lors du TTh. L'objectif de la thèse est donc de montrer quels sont les paramètres clés du TTh et de répondre quant à la pertinence des recommandations QuesTek. Ce projet cherchera également à déterminer quelle microstructure est à l'origine d'un tel compromis de propriétés et s'il peut être optimisé par des modifications de TTh.

2. Avancement

Afin d'étudier l'influence des recommandations de TTh, un plan d'essai complet est mis en place en faisant varier : la température du palier, la vitesse de chauffe à l'austénitisation, la température d'austénitisation et le temps et la température de revenu.

De manière systématique la microstructure a été étudiée par microscope optique, MEB, DRX conventionnelle, DRX synchrotron et Diffusion de Neutrons aux Petits Angles (DNPA). Les propriétés mécaniques ont été caractérisées par des essais de traction et de microdureté.

Les résultats sont surprenants avec une stabilité remarquable des propriétés selon les paramètres du TTh. Les microstructures obtenues après revenu sont également très similaires avec une structure martensitique et des carbures M_2C mises en évidence par DNPA mais non détectables par DRX et DRX synchrotron (voir **Figure 5**). Seuls les paramètres du revenu semblent modifier les propriétés.

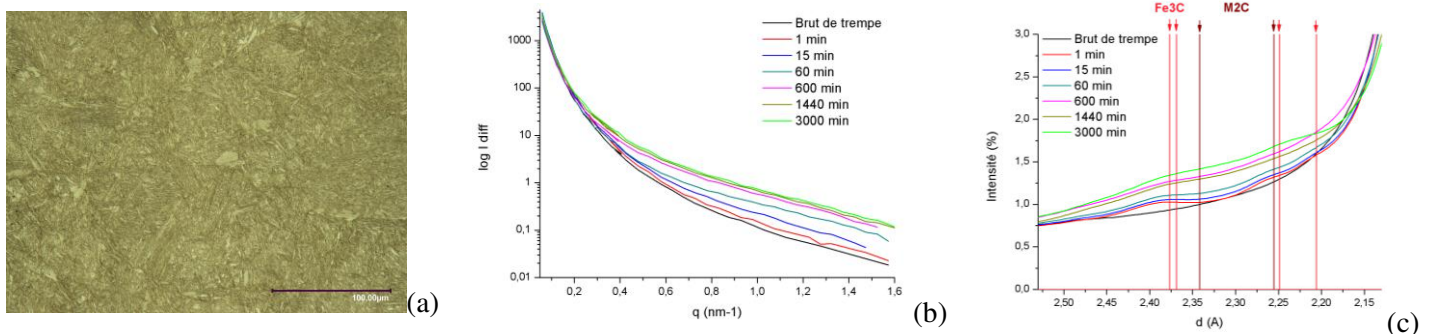


Figure 5: (a) Cliché au M.O. après attaque Nital 2%, (b) évolution de l'intensité diffusée en DNPA en fonction du temps de revenu et (c) Spectres de DRX synchrotron en fonction du temps de revenu

3. Conclusion et perspectives

Les préconisations de TTh de QuesTek ne modifient pas la microstructure finale et les propriétés de l'acier. Cependant, les variations de propriétés mécaniques observées par MBD proviennent d'un phénomène qu'il convient d'identifier. D'autres paramètres du TTh vont ainsi être investigués. En revanche, le revenu semble contrôler les propriétés. Comme pour l'Aermet® 100, le faible taux de cémentite et une répartition fine et homogène des M_2C sont peut être à l'origine des propriétés du M54[4]. Le revenu sera donc étudié plus en détails. Pour compléter ces résultats, des analyses au MET, en ATD et dilatométrie et de dissolution sélective vont être mis en place.

Références :

- [1] J. Hertz, "Diagrammes d'équilibre Alliages ternaires et multiconstitués," *Techniques de l'ingénieur*. 2003.
- [2] M. G. H. Wells, "Advances in Steels for Aerospace Applications," *Key Eng. Mater.*, vol. 77–78, pp. 71–80, 1992.
- [3] QuesTek, "Processing Information QPI-M54," 2012.
- [4] R. Ayer and P. M. Machmeier, "Transmission electron microscopy examination of hardening and toughening phenomena in Aermet 100," *Metall. Trans. A*, vol. 24, no. 9, pp. 1943–1955, Sep. 1993.

Caractérisation du comportement des produits minces par nanoindentation

Doctorant : César Moisés SANCHEZ CAMARGO¹

Encadrants : Catherine MABRU², Anis HOR³

¹ cesar-moises.sanchez-camargo@isae.fr

² catherine.mabru@isae.fr, ³ anis.hor@isae.fr

Résumé — L'objectif de ce travail de thèse est de proposer une méthodologie de caractérisation par nanoindentation à l'aide d'un modèle inverse. La première étape de ce travail est de trouver une surface dont les caractéristiques mécaniques sont représentatives du matériau (surface libre de contraintes résiduelles ou d'écrouissage), et de mettre au point un modèle numérique de l'essai d'indentation.

Abstract — The objective of this thesis is to provide a new methodology of characterization by nanoindentation test based on inverse analysis. The first stage of this thesis is focused on obtaining a surface whose mechanical characteristics are representative of the core material (i.e. without any residual stresses or hardening) and implementing a first numerical model.

1. Introduction

L'essai de nanoindentation semble être prometteur pour la détermination des lois de comportement des matériaux, lorsque le prélèvement d'éprouvettes est très compliqué ou impossible (matériaux multi-phase, revêtements). L'objectif de ce travail de thèse est de proposer une méthodologie de caractérisation par nanoindentation à l'aide d'un modèle inverse.

2. Résultats

Dans la préparation de la surface pour la nanoindentation un processus d'usinage mécanique est souvent employé. L'effet combiné des charges mécaniques et thermiques dans l'usinage définit l'état final de la contrainte résiduelle dans la surface [3] ainsi que son écrouissage. Dans cette étude la couche affectée par l'usinage a été enlevée progressivement par polissage manuel dans notre éprouvette d'acier 316L. Dans chaque polissage la surface a été testée avec un indenteur Berkovich, à une force de 50 mN, et à un déplacement de 500 nm. L'épaisseur de l'éprouvette a été contrôlée avec une colonne de mesure pour déterminer l'épaisseur enlevée mais aussi pour préserver la planéité de la surface. Tous les paramètres obtenus directement par la courbe d'indentation ou calculés à l'aide de cette courbe ainsi que l'empreinte résiduelle ont été observés. Un total de 13 polissages a été réalisé. A partir du polissage 9 la surface montre des caractéristiques stables, comme illustré en Figure 1 par l'évolution de la dureté $H = F/A$ (où F est la force d'indentation et A l'aire projetée à charge maximale). Ce 9^{ème} polissage correspond à une épaisseur de couche enlevée de 145 μm . Ces résultats montrent que la couche affectée par l'usinage est beaucoup plus grande que la profondeur d'indentation maximale de 2,5 μm dans le 316L (imposée par la limite de charge de la machine). D'autre part, dans l'empreinte résiduelle, nous avons observé une diminution du bourrelet d'environ 100 nm, qui disparaît pour la surface stabilisée. Or le calcul de l'aire de contact peut être affecté jusqu'à 30% par le bourrelet [1]. Cette étude met donc en évidence que le bourrelet pourrait provenir de la préparation de la surface.

Cette étude révèle ainsi l'importance de la préparation de la surface, et le risque de caractériser une surface qui contient des contraintes résiduelles ou de l'écaillage. Un polissage miroir aide donc uniquement à réduire les problèmes de rugosité et de premier point de contact mais ne suffit pas toujours à obtenir une surface représentative du matériau.

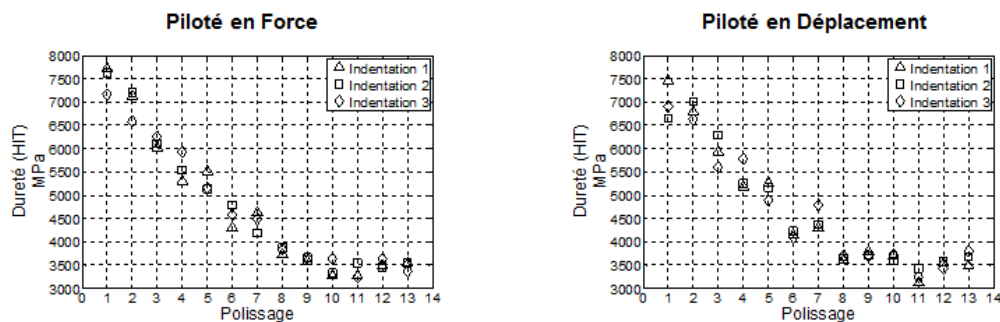


Figure 1 – Evolution de la dureté dans la couche affectée par l'usinage.

La mise au point de deux modèles Eléments Finis macroscopiques a été faite en prenant comme référence les résultats présentés par Bolshakov et al. [2] dans son étude numérique du bourrelet. Les deux modèles (3D et axisymétrique) donnent des résultats similaires.

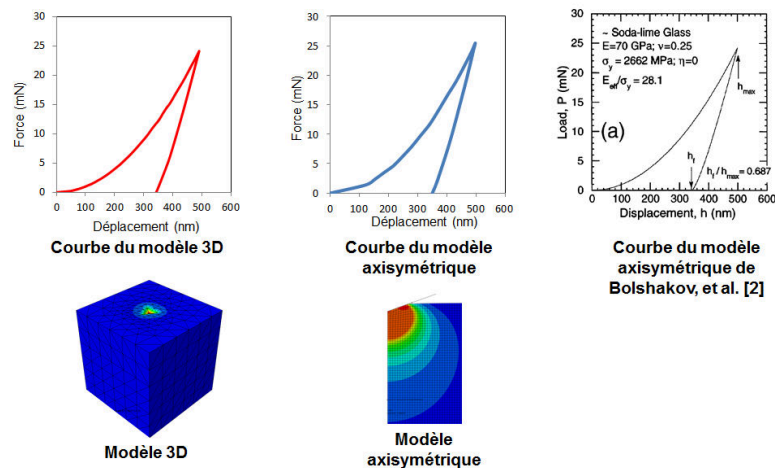


Figure 2 –Comparaison des courbes de nanoindentation obtenues numériquement.

3. Perspectives

Des nouvelles études sur une couche affectée par le polissage mécanique sont prévues, qui donneront accès au matériau vierge. L'étude du matériau par nanoindentation avec des indenteurs de géométrie différente permettra l'obtention des paramètres de la loi de comportement macroscopique à partir d'un modèle inverse.

Références

- [1] Alcalá, J., Barone, A. C., & Anglada, M. The influence of plastic hardening on surface deformation modes around Vickers and spherical indents. *Acta Materialia*, 48(13), 3451-3464, 2000.
- [2] Bolshakov, A., & Pharr, G. M. Influences of pileup on the measurement of mechanical properties by load and depth sensing indentation techniques. *Journal of materials research*, 13(04), 1049-1058, 1998.
- [3] Nespor, D., Denkena. Differences and similarities between the induced residual stresses after ball end milling and orthogonal cutting of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 226, 15-24, 2015

Etude et optimisation des conditions de refroidissement de pièces SPF.

Doctorant : Maxime ROLLIN¹

Encadrants : Luc PENAZZI², Vincent VELAY³

¹ maxime.rollin@mines-albi.fr

² luc.penazzi@mines-albi.fr, ³ vincent.velay@mines-albi.fr

Résumé — Au sein d'Airbus, la plupart des pièces complexes de carénage des mats réacteurs et les entrées d'air de réacteurs en alliage de titane sont produites par formage superplastique (SPF). Ces pièces sont refroidies après leur mise en forme pour faciliter leur extraction et augmenter les flux de production, mais un temps important est consacré à la reprise des défauts géométriques générés par le refroidissement. Ce projet a pour but d'étudier l'évolution du comportement thermomécanique de l'alliage de TA6V et des échanges thermiques lors de la phase de refroidissement dans le but de minimiser les distorsions des pièces.

Abstract — In AIRBUS, most of the complex shaped titanium fairing parts of pylon and air inlets are produced by superplastic forming (SPF). These parts are cooled down after forming to ease their extraction and increase the production rate, but a large amount of time is wasted to go back over the geometric defects generated by the cooling step. This project aims to study the evolution of the thermomechanical behavior of Ti64 and heat exchanges during cooling in order to minimize distortions.

1. Introduction –

a. Contexte

Le procédé SPF au sein d'AIRBUS concerne partir plusieurs alliages de titanes, et en particulier le TA6V. De nombreuses études [1]–[3] ont mis en évidence le fait que pour des couples de température et vitesses de déformations (associés à une morphologie de grains équiaxes et une taille de grains inférieure à 10 microns, le TA6V possède des propriétés d'allongement bien supérieures aux alliages classiques dans les mêmes conditions. De ce fait, le procédé SPF offre l'avantage de permettre la mise en forme de géométries complexes, sans assemblage et enlèvement de matière., mais avec des temps de process long (plusieurs heures) contenu des vitesses de déformations (inférieures à 10^{-3} s^{-1}).

De façon à augmenter les cadences de production, le refroidissement des pièces est accéléré après mise en forme par soufflage de gaz au travers de buses positionnées au dessus de la face supérieure de la pièce. Ce qui a pour effet d'augmenter sa rigidité et de faciliter son extraction. Cette étape induit des contraintes thermiques sur la pièce qui possède des épaisseurs hétérogènes et qui est contenue dans l'outillage. La combinaison de toutes ces conditions provoquent des déformations plastiques et fait apparaître des contraintes résiduelles à froid, qui entraînent une géométrie non conforme une fois la pièce détournée.

b. Problématique

La problématique de cette thèse consiste à développer un modèle numérique capable de prédire le comportement thermomécanique de la tôle ainsi que les échanges tôle-outillage lors de la phase de défournement afin d'optimiser la stratégie de refroidissement et réduire les distorsions des pièces.

c. Objectifs scientifiques

L'objectif est de pouvoir disposer d'un modèle numérique capable de reproduire les déformations induites par le processus de refroidissement. Plusieurs verrous scientifiques et technologiques comme

la modélisation du comportement du matériau, la compréhension des échanges thermiques et des conditions limites mécaniques entre la tôle et les outillages sont à lever.

2. Avancements

a. Caractérisation : matériau

La littérature nous montre que cet alliage est fortement sensible aux vitesses de déformation et que cette sensibilité évolue beaucoup avec la température et la microstructure de celui-ci [3], [4]. Mais il y a peu d'information concernant l'évolution de la microstructure et des propriétés associées dans les conditions de refroidissement du procédé ($T < 900^{\circ}\text{C}$; $\dot{T} \in [-5; 30]^{\circ}\text{C/s}$). Pour répondre à cette problématique, une première étape d'essais préliminaires a été réalisée dans l'objectif de discriminer les paramètres influant sur les propriétés mécaniques de l'alliage dans les conditions de sollicitations thermomécaniques du procédé. Les essais préliminaires ont permis de mettre en évidence l'influence de différents paramètres du refroidissement sur les propriétés mécaniques et la microstructure.

b. Caractérisation : transferts thermiques

Concernant les échanges thermiques, toute la difficulté réside dans l'interaction d'échanges thermiques de natures différentes agissant simultanément (conduction, radiation et convection de l'environnement avec l'outillage et la pièce). Afin de reproduire ces phénomènes approximés, des modèles facilement implémentables dans les simulations numériques ont été sélectionnés. Des premiers essais de « soufflage » ont permis de caractériser un modèle de convection forcée issu de la littérature.

c. Simulation du procédé : un contrôle du refroidissement

Un modèle multi-étape du procédé complet a été mis en place. Dans un premier temps, l'étape de mise en forme est modélisée dans le but de prédire les évolutions d'épaisseurs de la tôle et de les transférer au début de l'étape de refroidissement. Cette caractéristique a une importance considérable sur la rigidité de la tôle au cours du refroidissement. Les différentes étapes de refroidissement sont ensuite modélisées par un calcul thermomécanique à couplage fort. Pour finir, l'étape de détournage est simulée en statique pour permettre de mesurer concrètement l'effet du refroidissement sur les déformations. L'impact de la stratégie de refroidissement dans ce modèle a été analysé de façon à évaluer la possibilité de minimiser les distorsions en jouant sur les paramètres du refroidissement [5].

Références bibliographique

- [1] M. Bellet, "Modelisation numerique du formage superplastique de toles," EMP, 1988.
- [2] A. K. Ghosh and C. H. Hamilton, "Superplastic Sheet Forming," *ASM Met. Handb.*, vol. 14, pp. 852–863, 1988.
- [3] A. K. Ghosh and C. H. Hamilton, "Mechanical behavior and hardening characteristics of a superplastic Ti-6Al-4V alloy," *Metall. Trans. A*, vol. 10, no. 6, pp. 699–706, Jun. 1979.
- [4] S. L. Semiatin, V. Seetharaman, and I. Weiss, "Hot workability of titanium and titanium aluminide alloys - an overview," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 243, no. 1–2, pp. 1–24, Mar. 1998.
- [5] M. Rollin et al., "Thermo-Mechanical Modeling of Distortions Promoted during Cooling of Ti-6Al-4V Part Produced by Superplastic Forming," 2015.

Étude du comportement mécanique de tôles en alliage de titane et des paramètres procédés dans les opérations de formage à chaud.

Doctorant : Quentin SIRVIN¹

Encadrants : Luc PENAZZI², Vincent VELAY³

¹ quentin.sirvin@mines-albi.fr, ² luc.penazzi@mines-albi.fr, ³ vincent.velay@mines-albi.fr

Résumé — Le projet repose sur le développement du procédé d'emboutissage à chaud de tôles d'alliage de Titane en conditions isothermes dans la gamme 400-700°C. Par conséquent, il faut déterminer les paramètres procédés et matériaux optimaux de manière à réussir la mise en forme de pièces industrielles. Les paramètres influençant le comportement d'un alliage de Titane Ti6Al4V devront être analysés et quantifiés afin d'identifier un modèle de comportement. Ils peuvent être de différentes natures (écrouissage, viscosité, anisotropie...) et évoluer en fonction de la température du flanc.

Abstract — The project is based on the development of the hot stamping process of Titanium alloy sheet under isothermal conditions and for a temperatures range of 400-700°C. Therefore the optimal materials and processes parameters have to be determined to successfully shape industrial parts. These material parameters influencing the behavior of Ti6Al4V titanium alloy will be analyzed and quantified to identify a pattern of behavior. These parameters can be about different types (work hardening, viscosity, anisotropy ...) and can evolve with the temperature.

1 Objectifs et problématiques technicoéconomiques et scientifiques

L'objectif est de développer un procédé d'emboutissage à chaud de tôles de Titane Ti6Al4V. Ce procédé utilisera des outils (poinçon/matrice/serre-flanc) préchauffés. Le flanc sera porté à la température de mise en forme en amont puis acheminé sur la presse. Cette thèse vise donc à déterminer les paramètres procédés permettant de tirer le meilleur parti du comportement matériau de manière à optimiser la mise en forme de pièces industrielles en emboutissage isotherme à chaud.

2 Des essais thermomécaniques à la modélisation du comportement

L'étude bibliographique a permis d'identifier un certain nombre de phénomènes matériau de l'alliage Ti6Al4V à prendre en considération. Ainsi l'anisotropie[1], la sensibilité à la vitesse de déformation[2], la température[3] et la dissymétrie de comportement en traction/compression[1], devront être considérées dans la formulation d'un modèle de comportement. Comme le montrent Odenberger et al[4] ou Gilles et al[1] le critère de plasticité le plus adapté est le « CPB04 » décrit par Cazacu et al[5].

L'identification des différents coefficients de ce critère nécessite l'identification des déformations longitudinales et transversales (ϵ_l, ϵ_t) lors d'essais de traction/compression simple. Ainsi la mesure de champs de déformation est un outil adapté pour cette identification. Les premiers essais de traction isotherme à différentes températures ont d'ores et déjà été réalisés. Ils ont permis d'éprouver ce nouvel équipement qui permet de réaliser des mesures de déformation dans le plan. La Figure 6 a) présente les isocontours des déformations longitudinales obtenus par corrélation d'images à 600°C (gradient inférieur à 5°C). L'exploitation des résultats a mis en évidence l'influence de la température et de la vitesse de déformation sur l'allongement des tôles de Ti6Al4V. La Figure 6 b) montre le graphe contrainte vraie / déformation vraie des essais de traction à 400, 500, 600 et 700°C pour une vitesse de déformation de 10^{-2}s^{-1} . L'étude de ces courbes permet de mettre en évidence la déformation longitudinale maximale à rupture.

Une seconde vague d'essais expérimentaux sera réalisée suivant une forme d'emboutissage simple (forme de Ω). Ces essais, inspirés de ceux d'Odenberger et al[4] auront un but double : mesurer le

retour élastique des pièces embouties ; éprouver la loi de comportement par comparaison des résultats expérimentaux et numériques.

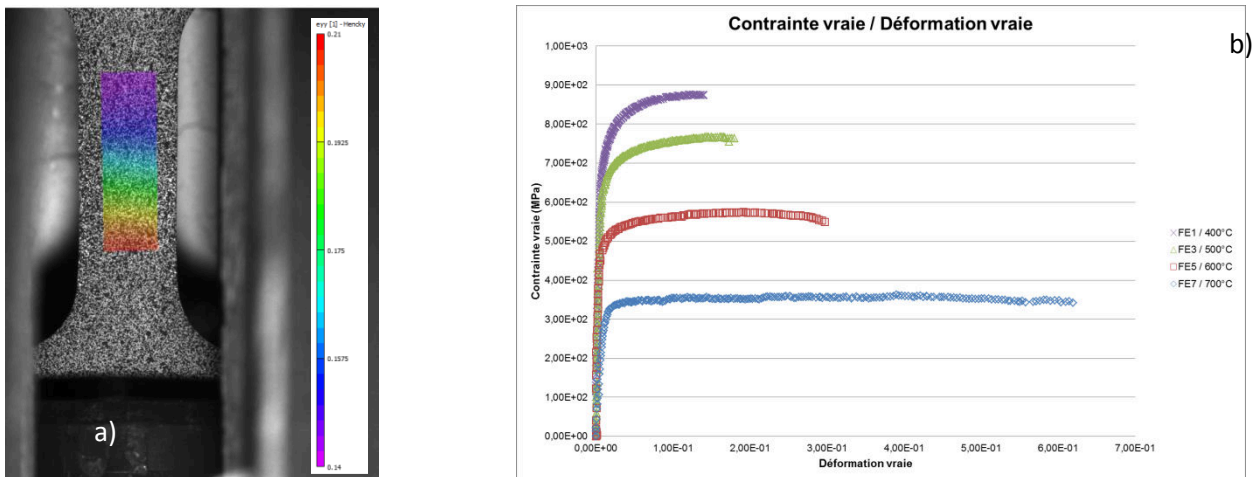


Figure 6 : a) Calcul VIC® de la déformation longitudinale ; b) Graphe contrainte vraie/déformation vraie des essais d'érouissage à différentes températures pour une vitesse de déformation de 10^{-2}s^{-1}

3 Simulation numérique des opérations d'emboutissage simple

Pour les premières simulations numériques des essais de formage en Ω , le comportement du matériau est défini par un modèle de Prandtl-Reuss. Ce modèle utilise des données matériau issues de la littérature et du savoir du laboratoire. Ce modèle sera par la suite optimisé grâce aux différentes données retenues par mes travaux. Ces simulations ont déjà permis de mettre en évidence l'influence de l'effort serre flanc, (contrôle de l'écoulement de matière) des rayons (matrice et poinçon) ainsi que du coefficient de frottement tôle/outil sur le retour élastique de la pièce après emboutissage.

4 Conclusions et perspectives

L'état de l'art et les premiers essais d'érouissage ont permis de mettre en évidence les points nécessaires à étudier pour les besoins du projet. Les premières simulations numériques permettent d'ores et déjà de pouvoir intégrer les propriétés matériau au fur et à mesure de leurs identifications. Dans les mois à venir les essais d'érouissage, de caractérisation complète des propriétés matériaux, et les essais d'emboutissage en Ω seront réalisés. La confrontation des essais expérimentaux et des résultats des simulations numériques permettront de vérifier la justesse de la loi de comportement avant l'ultime phase d'industrialisation. Enfin il est également envisagé de réaliser, en parallèle, des essais de frottement à haute température. Ceux-ci permettront d'identifier un coefficient de frottement du couple matériaux tôle/outil, toujours dans l'idée de simuler au plus juste les futures opérations d'emboutissage.

5 Remerciement

Luc Penazzi (Maitre Assistant HDR) et Vincent Velay (Maitre Assistant) pour leur encadrement. Rebecca Bonnaire (Maître Assistant associée), Didier Ade et Thomas Papaix (Techniciens) pour leurs accompagnements dans les essais thermomécaniques et mesure de déformation par corrélation d'images.

6 Références bibliographiques

- [1] G. Gilles et al, "Experimental characterization and elasto-plastic modeling of the quasi-static mechanical response of TA-6V at room temperature," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 48, no. 9, pp. 1277–1289, May 2011.
- [2] A. Majorell et al, "Mechanical behavior of Ti-6Al-4V at high and moderate temperatures - Part I: Experimental results," *Mater. Sci. Eng. a-Structural Mater. Prop. Microstruct. Process.*, vol. 326, pp. 297–305, 2002.
- [3] S. Nemat-Nasser et al, "Dynamic response of conventional and hot isostatically pressed Ti-6Al-4V alloys: Experiments and modeling," *Mech. Mater.*, vol. 33, pp. 425–439, 2001.
- [4] E. Odenberger et al, "Material Characterisation for Analyses of Titanium Sheet Metal Forming," 2005.
- [5] O. Cazacu et al, "Orthotropic yield criterion for hexagonal closed packed metals," *Int. J. Plast.*, vol. 22, no. 7, pp. 1171–1194, Jul. 2006.

Evaluateur technologique pour l'étude de la tenue au souffle d'un fuselage composite : de l'influence du processus de fabrication à l'évaluation de sa tenue résiduelle.

Doctorant : Thibaut PACCOU¹

Encadrants : Francis COLLOMBET², Laurent CROUZEIX, Alain ROUQUAND³, Yves-Henri GRUNEVALD⁴ (C.E.S) et al.

¹ thibaut.paccou@cea.fr

² francis.collombet@iut-tls3.fr, ³ alain.rouquand@cea.fr, ⁴ yh.grunevald@composites-expertise-solutions.com

Résumé — Le but des travaux de cette thèse est de proposer une méthode originale pour évaluer numériquement et expérimentalement la vulnérabilité d'un fuselage composite à une détonation interne de faible ampleur, typique d'une attaque terroriste. On met en place une méthodologie d'étude de cette vulnérabilité à l'aide d'évaluateurs technologiques multi-instrumentés (ETMIs) représentatifs du séquençage des événements et par là même de l'évolution de l'état de contrainte du fuselage au souffle et dans le cadre de cette thèse plus particulièrement dans la zone de peau courante située entre 2 lisses et 2 cadres. De dimensions et coût limités, ces ETMIs sont spécifiquement conçus pour rendre compte des mécanismes mis en jeu aux différentes échelles et permettent également d'introduire l'influence des conditions d'élaboration sur la tenue au souffle.

Abstract — the goal of this thesis is to suggest an original method to evaluate both numerically and experimentally the vulnerability of a composite fuselage to an interne detonation of low intensity, typical of a terrorist attack. We develop a methodology that aims to study this vulnerability thanks to multi-instrumented technological evaluators (MITEs) that are representative sequencing of the events and hence the evolution of the stress state of the fuselage to blast. Both limited in size and cost, those MITEs are specifically designed to take into account the multi scale mechanisms involved and also allow to introduce the influence of the influence of the elaboration process upon the blast behavior.

Depuis qu'elle existe, l'aviation civile a été une cible de choix pour mener des attaques terroristes et plusieurs études ont été menées pour déterminer la vulnérabilité des fuselages en aluminium face à des explosions internes de faible intensité afin d'en améliorer leur tenue [1]. Cependant, peu de données sont disponibles dans la littérature ouverte, et aucune méthodologie d'étude fine n'existe. L'avènement des fuselages en composite sur les longs courriers (A350, B787 et certains bizjets) ajoute un niveau de complexité alors que les données disponibles sont encore plus limitées, que ce soit à échelle une ou à échelle réduite. Concernant la vulnérabilité de fuselages en composite, nous n'avons identifié qu'une seule thèse concernant l'étude des effets d'un chargement en souffle interne et, compte tenu des coûts associés à la réalisation d'un tronçon composite (même à une échelle réduite) le nombre d'essais limité au maximum (1 essai) ce qui élimine toute possibilité de conduire une étude de sensibilité (paramètres géométriques, de raideur, ...) et/ou de variabilités.

Notre but est de mettre en place une méthodologie d'analyse numérique et d'essais originale permettant, à terme, d'évaluer l'influence de différents paramètres sur l'endommagement d'un élément de fuselage soumis à un souffle dû à une détonation interne. Les scénarii d'endommagement sont multiples (déchirure de peau, arrachement de raidisseur ou de clip ...) et peuvent varier selon l'emplacement et la quantité d'explosif dans le fuselage. Il n'est pas possible, dans le cadre de cette thèse, de traiter toutes les configurations. Nous nous sommes donc focalisés sur le comportement de la zone de peau courante située entre deux lisses et deux cadres. Ce choix résulte de deux facteurs :

- le premier est que la surface de peau courante est proportionnellement beaucoup plus grande

(environ 3 fois) que la surface projetée des lisses et des cadres et la probabilité que la charge se trouve plutôt en face d'une zone de peau courante est donc plus élevée ;

- le second est que la seule thèse disponible dans la littérature ouverte concerne l'étude de cette zone et que nous utilisons comme point de départ de notre démarche.

Pour faire face à cette multiplicité des scénarios, nous utilisons des pièces de dimensions et coût limités appelées Evaluateurs Technologiques Multi-instrumentés (ETMI). Ces ETMIs prennent part à un dialogue essais/calculs adapté aux structures composites, où des simulations numériques guident le dimensionnement de l'ETMI, qui lui-même sert à recalculer le modèle suite à des essais. On cherche à observer une succession similaire d'événements dans les deux pièces, le principe étant que, pour chaque événement, l'état de contrainte dans l'ETMI respecte, au minimum, un ratio d'influence des composantes les plus importantes, relativement proche de celui présent dans la pièce de référence. L'approche ETMI ne repose pas sur un type particulier de chargement (statique, dynamique lente ou rapide, ..). Elle consiste, à partir de l'analyse numérique de l'objet de référence (ici le fuselage à échelle réduite utilisé dans la thèse [2]), à identifier le comportement de la zone d'intérêt en regard de la chronologie de la sollicitation et du comportement de la structure puis à définir et optimiser l'évaluateur qui permettra d'étudier à moindre coût ce comportement (ou cette série d'événements). Il existe en général plusieurs solutions possibles, celle que nous avons retenue est composée de deux zones distinctes : une zone dite zone d'intérêt, de dimension égale et de drapage identique à la zone d'étude du fuselage à échelle réduite, et où l'on souhaite observer l'état de contrainte ; l'autre zone, dite zone externe, ayant pour but de simuler l'environnement du fuselage (effet des raidisseurs en flexion torsion...). Dans notre cas la raideur de torsion est essentiellement pilotée par la géométrie et l'échantillonnage de la zone externe alors que la raideur de flexion est pilotée conjointement par la géométrie, l'échantillonnage et l'ajout de ressorts périphériques.

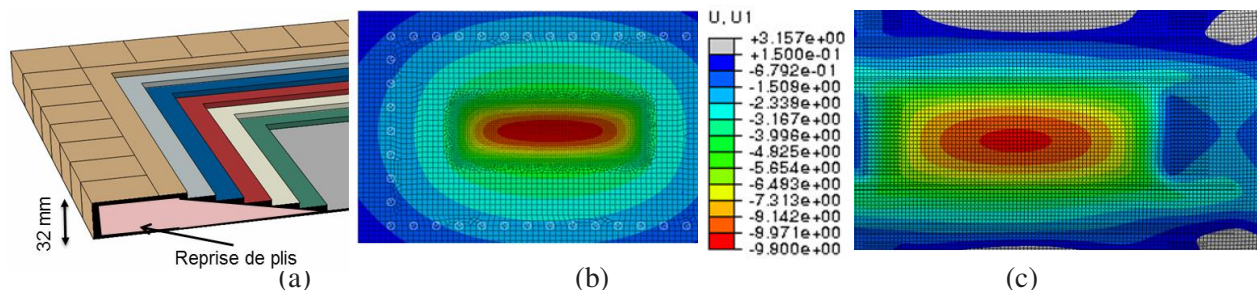


Figure 7: Dimensions de l'évaluateur avec la zone d'intérêt (en gris), la zone externe (en différentes couleurs selon son épaisseur) et les ressorts (disposés en rangée dans la zone beige) (a) et comparaison des déplacements hors plan entre l'ETMI (b) et le fuselage (c).

Une fois l'ETMI dimensionné, il est fabriqué et instrumenté. L'évaluateur est fixé à un support via ses ressorts. Une sphère d'explosif est centrée devant la zone d'intérêt. Des mesures de déformation par corrélation d'images, des mesures de pression pour caractériser le souffle sont prévues pendant l'essai. On instrumente également l'évaluateur à l'aide de fibres optiques à réseau de Bragg noyées dans l'un des plis de la zone d'intérêt. Ces réseaux servent à la fois à suivre l'évolution des déformations résiduelles de cuisson et à mesurer la déformation en temps réel lors du souffle à l'aide d'un interrogateur femtoseconde. La suite de la thèse consiste notamment à dépouiller les résultats des essais de souffle pour recalculer le modèle numérique de l'évaluateur de déchirure de peau. On peut noter qu'un essai de souffle sera réalisé dans un fuselage à échelle réduite en composite et comparé aux analyses des ETMIs.

Références

- [1] Civil Aviation Authority, Aircraft hardening research program, final overview report, 2001
- [2] Kotzakolios T, Vlachos DE, Kostopoulos V. Blast response of metal composite laminate fuselage structures using finite element modelling, Composite Structures, 2011

Systèmes Epoxy – Cuisson basse température.

Doctorant : Léonard Serrano

Encadrants : Philippe Olivier², Jacques Cinquin³

¹ leonard.serrano@irt-saintexupery.com

² philippe.olivier@iut-tlse3.fr, ³ jacques.cinquin@airbus.com

Résumé — Les principaux verrous concernant la mise en œuvre de pièces composites sont liés aux moyens de cuisson – principalement les autoclaves – à la longueur de leurs cycles et aux coûts. Afin de diminuer ces coûts, des matériaux hors autoclaves ont été considérés pour la fabrication de pièces de structure à haute cadence de fabrication telles que les longerons, trappes, etc... Toutefois, les procédés hors-autoclave ne possèdent pas la même maturité que leur équivalent, surtout concernant la qualité de pièce. Notre rôle est de comprendre les mécanismes physico-chimiques de ces matériaux, et de maîtriser les paramètres de fabrication liés à ceux-ci.

Abstract — The main challenges with composite parts manufacturing are related to the curing means, mainly autoclaves, the length of their cycles and their operating costs. In order to decrease this dependency, out of autoclave materials have been considered as a solution for high production rate parts such as spars, flaps, etc... However, most out-of-autoclave process do not possess the same maturity as their counterpart, especially concerning part quality. This thesis work focuses on the understanding of Out-of-Autoclave materials' chemical and physical structure, their behavior during curing, and also the processing parameters for optimal part quality.

1. Résumé de la thèse

En l'espace de 40 ans, l'usage de matériaux composites dans l'aéronautique civile et militaire a fortement progressé. Aujourd'hui, des avions tels que l'Airbus A350 XWB et le Boeing 787 Dreamliner sont constitués à plus de 50% de matériaux composites à matrice organique.

Afin de répondre à une forte cadence de fabrication (supérieure à 40 avions par mois), il est nécessaire d'investir dans des installations supplémentaires très coûteuses et énergivores : les autoclaves.

En parallèle de cet essor, les matériaux préimprégnés ont fortement gagné en complexité. Il existe dorénavant des matériaux pouvant être mis en œuvre sans application de pression, à plus faible température, dont les propriétés mécaniques finales sont proches de celles des matériaux destinés à la fabrication en autoclaves.

Le procédé VBO (Vacuum Bag Only) est un procédé similaire au procédé en autoclave, excepté que la cuisson s'effectue dans un four traditionnel avec mise sous vide des pièces dans une vessie étanche, et donc sans application de pression sur le stratifié. Cette absence de pression est un avantage en termes de coût, toutefois elle peut induire plusieurs défauts qui jusqu'à présent étaient acceptables pour des pièces de structures secondaires mais qu'il convient de réduire pour les pièces de structures primaires.

Les matériaux utilisés pour le procédé VBO sont des matériaux de microstructure et de structure chimique différente des matériaux pré-imprégnés classiques. Ce sont ces différences que nous

souhaitons mettre en évidence tout en améliorant la compréhension des phénomènes qui en sont les causes.

Pour cela, nos recherches se sont focalisées sur 3 matériaux commercialisés sous l'appellation « Hors Autoclave ». Ce sont des matériaux de « classes » (c'est-à-dire de température de cuisson) différentes dont on suppose que les espèces chimiques sont différentes. Un des objectifs principaux de cette thèse est de mettre en avant les liens entre la structure chimique¹ d'une part, et la mise en œuvre et les propriétés finales d'autre part.

Une fois ces matériaux reçus, nous avons divisé l'étude en 3 points :

Dans une première phase, nous avons démarré une étude des caractéristiques physicochimiques des 3 systèmes préimprégnés hors autoclave supports de ces travaux de thèse. L'objectif est de mettre en place des modèles de cinétique² de réaction et de comportement rhéologique de façon à pouvoir ensuite simuler les évolutions de degré d'avancement de la réaction de polymérisation et de la viscosité.

Par ailleurs, le comportement vis-à-vis de l'humidité a été étudié car il est au cœur de la problématique du développement des porosités³. L'idée sous-jacente est de relier la prise d'humidité de ces prépregs avec les taux de porosités des stratifiés après cuisson sous vide et sans pression.

Sur la base des résultats de cinétique chémorhéologique et de reprise d'humidité, la deuxième phase a consisté à étudier l'influence des cycles de polymérisation, des différentes conditions de produits d'environnement et de mise sous vide sur les taux de porosité⁴. Pour cela, nous étudierons expérimentalement et numériquement le phénomène de compaction des plis de préimprégné avant et pendant la cuisson.

Ces paramètres de fabrication seront prochainement reliés aux caractéristiques mécaniques d'usage des stratifiés représentatifs de zones courantes de structure primaire aéronautique. Cette dernière partie servira à déterminer si l'usage de pré-imprégnés hors autoclave est envisageable pour la fabrication de pièces composite à haute cadence de production.

Références

- [4] T. Kamon, H. Furukawa. Curing mechanisms and mechanical properties of cured epoxy resins, *Advance in Polymer Science*, Vol. 80, Pag.173-202, 2005.
- [5] S. Sourour, M.R. Kamal. Differential scanning calorimetry of epoxy cure : isothermal cure kinetics, *Thermochimica Acta*, Vol. 14, issue 1-2, Pag. 41-59, 1976.
- [6] L.K. Grunenfelder. Void formation in composite prepregs – Effect of dissolved moisture, *Composites Science and Technology*, Vol. 70, issue 16,, Pag. 2304-2309, 2010.
- [7] T. Centea, P. Hubert. Out-of-autoclave prepreg consolidation under deficient pressure conditions, *Journal of Composite Materials*, Vol 48, issue 16, Pag. 2033-2045, 2014.

Elaboration de pièces composites aéronautiques complexes à partir de préformes textiles thermoplastiques et consolidation en autoclave

Doctorant : Julien PATOU¹

Encadrants : Gérard BERNHART², Emmanuel DE LUYCKER³

¹ julien.patou@mines-albi.fr, ² bernhart@mines-albi.fr, ³ Emmanuel.De-Luycker@iut-tarbes.fr

Résumé — Les procédés classiques de mise en œuvre de pièces composites thermoplastiques sont mal adaptés pour des géométries complexes. Cette thèse étudie une voie d'élaboration basée sur la mise en forme de textile intégrant par voie comélagé/cotissage les renforts de carbone et les fils thermoplastiques, suivie d'une consolidation en autoclave. Une première partie est consacrée à l'étude de la drapabilité et la simulation de la mise en forme de préformes textiles avant consolidation. La deuxième partie est consacrée à l'étude et à l'optimisation des conditions et cycles de consolidation en autoclave et de leurs influences sur les performances mécaniques et la santé matière du matériau.

Abstract — Current thermoplastic composites processes are not suited for complex shape part manufacturing. This thesis investigates a manufacturing process based on textiles made in commingled/co-woven carbon yarns and thermoplastic filaments and an autoclave consolidation process. Firstly, the project deals with the study and simulation of the textile forming before the consolidation step. Secondly the work focuses on the study and the optimization of autoclave consolidation parameters and processing cycles. It also assesses the impact of processing parameters on mechanical properties and quality of the composite parts.

1. Les objectifs industriels: fils conducteurs de la thèse

L'introduction des matériaux composites à matrice thermoplastique est étudiée depuis plusieurs années par les avionneurs pour la mise en œuvre de pièces composites. La réglementation **REACH** imposent aux industriels des contraintes sur le choix des polymères tels que les phénoliques qui optent, de ce fait, vers une utilisation accrue des résines **thermoplastiques**. La thèse s'inscrit dans la cadre du projet aéronautique **ACAPULCO** (AppliCAtion composite thermoPlastique pour pièces à doUbLe Courbure) financé par **FUI (Fond Unique Interministériel)**. Ce projet a pour objectif de développer des pièces **semi-structurelles** à **double rayon de courbure** à matrice **thermoplastique** et renforcées de fibres longues ou continues. Le développement de ces pièces secondaires (capotage, entrée d'airs...) autorise un intervalle acceptable de porosité plus élevé pouvant atteindre les 5 à 7%. Les températures de consolidation requises ainsi que les exigences de minimisation du coût des pièces ont conduit le projet à s'intéresser au procédé de consolidation en **autoclave**. La géométrie des pièces considérées nécessite également l'utilisation de préformes textiles avec intégration de fils de polymère pour optimiser sa **déformabilité** lors de la mise en forme. Ce travail de recherche s'intéresse ainsi à l'étude de la déformabilité des préformes textiles lors de leur mise en forme sur une géométrie complexe et à leur mise en œuvre par consolidation en autoclave.

2. Etude de déformabilité de semi-produits textiles en vue d'essais de drapabilité sur des géométries complexes

Des essais de déformation en cisaillement plan par la méthode **Bias Extension test** [1], [2] ont été menés afin de déterminer le comportement des tissus en termes de drapabilité (angle de blocage en cisaillement, contrainte à l'angle de blocage). Plusieurs semi-produits (renforts secs carbone, Comélé SCHAPPE FC/PPS) ont été étudié afin de sélectionner ceux possédant l'angle de blocage en cisaillement le plus élevé, synonyme de grande capacité de déformation avant la rigidification du tissu (Figure 1).

3. Influence de la consolidation sur les propriétés mécaniques

L'optimisation des paramètres et des cycles de consolidation en autoclave constitue le thème central de cette thèse. Plusieurs campagnes expérimentales ont été menées sur deux semi-produits (Pipreg poudré C/PPS et Comélé SCHAPPE C/PPS) afin d'évaluer l'influence des paramètres procédés (**T**, **P_{ext}**, **P_{vide}**, **t_{consolidation}**) sur la santé matière et les performances mécaniques du stratifié. L'application d'une pression de consolidation et d'un niveau de vide suffisant dans le stratifié permet de réduire significativement le taux volumique de porosité et

confirme les résultats établis notamment par **Lystrup et al. [3]**. Les résultats d'essais visant à corréler le taux volumique de porosité et les propriétés mécaniques ont mis en évidence une diminution significative des contraintes à rupture avec l'augmentation du taux de porosité : faible pour les essais de traction (10%), la chute atteint 25% en cisaillement interlaminaire et 40% en flexion 3 points en passant de 2,5% à 5,8% (Figure 2).

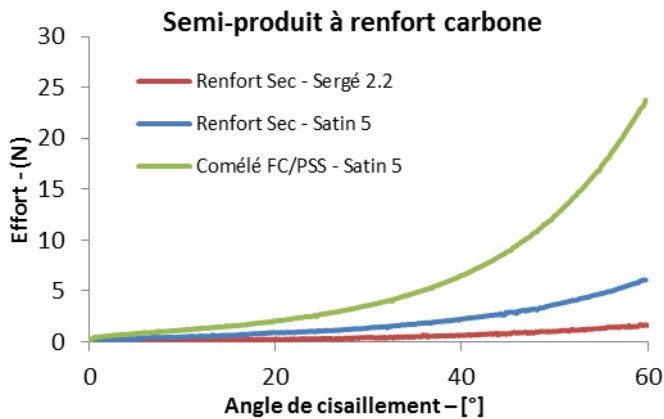


Figure 1 – Courbes effort / angle de cisaillement

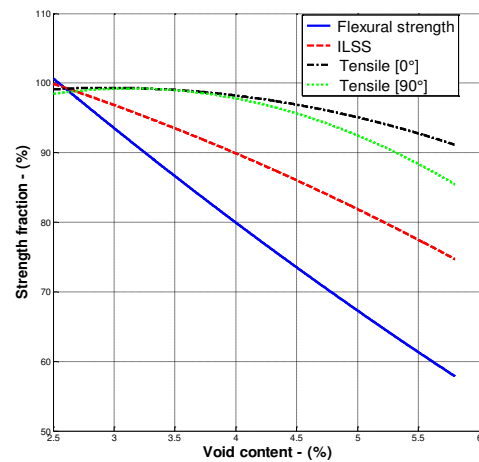


Figure 2 – Variation relative des propriétés en rupture

4. Perspectives de poursuite de thèse

Les essais **Bias Test** ont permis de présélectionner des tissus à forte drapabilité. Ceux-ci vont, par la suite, être mis en forme sur des géométries complexes. Le **pilote SPIF** (Figure 3), utilisé initialement pour l'étude de la déformation à température ambiante de tôle métallique, a été adapté pour effectuer des essais d'emboutissage de préformes textiles. La déformation textile va être observée par **stéréo-corrélation** d'image sur la base d'un **mouchetis** validé par des essais Bias Test. Les résultats seront confrontés à une **simulation de la mise en forme textile** par approche géométrique (**méthode dite du filet**) [1]. La validation de ces simulations s'effectuera sur des éprouvettes technologiques de mise en forme possédant une géométrie à courbure double du type **hémisphère** ou **prisme** (Figure 4). Dans les prochains mois, de nouvelles campagnes de consolidation de plaques composites vont être lancées afin d'évaluer **l'influence de la déformation textile sur les propriétés globales du stratifié**. L'objectif final de la thèse sera d'une part de corréler les essais expérimentaux avec les simulations numériques lors de la consolidation et de la déformation textile, et d'autre part de les relier au comportement mécanique des stratifiés élaborés à partir de textiles déformées. Cette connaissance permettra d'établir des stratégies de préparation des préformes selon la géométrie de la pièce et des tenues mécaniques requises.

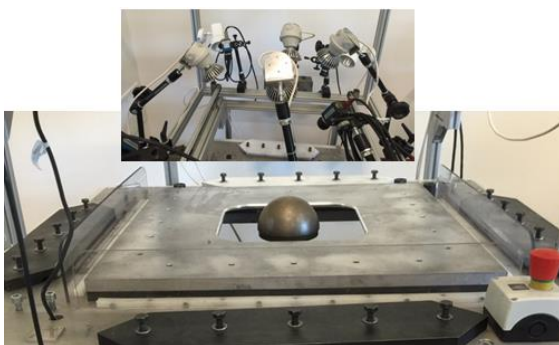


Figure 3 – Pilote SPIF avec poinçon hémisphérique

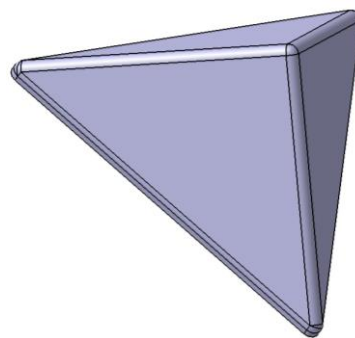


Figure 4 - Prisme pour essais de drapabilité - CATIA V5©

5. Références bibliographiques

- [1] P. Boisse, "Mise en forme des renforts fibreux de composites," *Techniques de l'Ingénieur*, p. 13, 2004.
- [2] W. Peng, H. Nahiène, B. Philippe, C. Philippe, and L. David, "Thermo-Mechanical Behavior of Stretch-Broken Carbon Fiber and Thermoplastic Resin Composites During Manufacturing," *Polym. Compos.*, p. 10, 2014.
- [3] A. Lystrup and T. L. Andersen, "Autoclave consolidation of fibre composites with a high temperature thermoplastic matrix," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 77, pp. 80–85, 1998.

Mise en œuvre de composites thermoplastiques par voie liquide réactive : expérimentation et modélisation.

Doctorante : Céline VICARD¹

Encadrants : Gérard BERNHART², Arthur CANTAREL³, Olivier DE ALMEIDA⁴

¹ celine.vicard@mines-albi.fr

² gerard.bernhart@mines-albi.fr, ³ arthur.cantarel@iut-tarbes.fr, ⁴ olivier.dealmeida@mines-albi.fr

Résumé — La polymérisation in-situ du PA6 dans un procédé par voie liquide réactif implique un mécanisme couplé avec la cristallisation. La bonne maîtrise du procédé passe par une compréhension globale de ce comportement réactionnel. L'analyse expérimentale des cinétiques, couplée à la modélisation, permet d'inclure cela dans une simulation globale. De plus, l'infusion est principalement gouvernée par l'évolution des propriétés rhéologiques. Enfin la présence des fibres est un facteur important car elles peuvent interagir avec le milieu réactionnel et modifier la qualité de l'imprégnation.

Abstract — The in-situ polymerization of PA6 in a liquid reactive process involves a coupled mechanism with crystallisation. Overall understanding of this reactional behaviour is mandatory for a proper control of the composite process. Thanks to experimental analysis of kinetics, coupled with modelling, this is taken into account in a global simulation. Moreover, the infusion is mainly governed by the evolution of rheological properties. Finally, the presence of fibres is an important factor to study because they could interact with the reactive environment and modify impregnation quality.

1. Contexte et problématiques

Depuis quelques années, des études s'orientent vers l'introduction de procédés de type voie liquide (RTM, infusion) pour l'élaboration de composites thermoplastiques [1]. Pour cela, la matrice est obtenue par polymérisation in-situ de son monomère de faible viscosité dans un renfort fibreux après imprégnation. Comparée aux procédés par fusion, cette voie permet de s'affranchir des semi-produits complexes et coûteux, des limitations dans les géométries de pièces et de réduire les temps de cycle.

Les travaux se sont focalisés sur le polyamide 6 (PA6) obtenu par polymérisation anionique par ouverture de cycle du ϵ -caprolactame (CL). La particularité de cette réaction réside dans le couplage possible entre la polymérisation des chaînes et leur cristallisation selon la température appliquée. Ces phénomènes, tous deux exothermiques, peuvent conduire à une mauvaise santé matière (réaction non totale, retrait, porosité). Ils doivent aussi être couplés au processus d'imprégnation (évolution rhéologique) et de contact avec le renfort fibreux (compatibilité, interaction).

La compréhension de ces mécanismes est donc un point crucial pour maîtriser ce type de procédé. Cela permet l'édition d'outils tels que les diagrammes Temps-Température-Transformation (TTT) et les diagrammes d'isoviscosité. Grâce à la modélisation de ces mécanismes, leurs différentes cinétiques peuvent être incluses dans une simulation globale du procédé par voie liquide.

2. Etude de la réaction du PA6

2.1. Analyses expérimentales des cinétiques

Le PA6 est obtenu par polymérisation de CL associé à un catalyseur caprolactame de bromure de magnésium (MgBrCL) et un activateur bifonctionnel de type N-carbamoyllactame (HDCL). L'analyse par DSC a été choisie pour caractériser les cinétiques de polymérisation et cristallisation en mesurant l'enthalpie dégagée par un mélange réactif (CL+MgBrCL+HDCL) en conditions isothermes et dynamiques [2]. La figure 1a (courbe bleue) montre l'allure d'un thermogramme obtenu en condition

isotherme (180°C), normalisé par l'intégrale de l'enthalpie totale. Deux pics exothermiques successifs sont observés et attribués respectivement à la polymérisation (1^{er}) et à la cristallisation (2nd).

Cette analyse sera complétée par un cycle résiduel en DSC (enthalpie de fusion, recristallisation), par des analyses DRX (caractérisation des cristaux) et ATG (degré de polymérisation final par évaporation du monomère résiduel).

2.2. Modélisation du couplage polymérisation-cristallisation

Dans la littérature [3], différents modèles sont disponibles pour décrire les cinétiques du degré de polymérisation α (ex : modèle de Malkin, modifié par Camargo) et du degré de cristallisation β (ex : modèle de Malkin). Le couplage se fait grâce à l'équation de Bolgov qui décrit le flux global de chaleur en deux termes attribués aux deux phénomènes. Elle a été modifiée en introduisant l'enthalpie totale dégagée pour obtenir l'évolution $d\gamma/dt$ (1) :

$$\frac{dq}{dt} \times \frac{1}{Q_1 + Q_2} = \frac{d\gamma}{dt} = w_p \frac{d\alpha}{dt} + (1 - w_p) \frac{d\beta}{dt} \quad (1) \quad , \text{ avec } w_p = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2}$$

où Q_1 et Q_2 sont les chaleurs de polymérisation et cristallisation respectivement. Ces différentes équations ont été implémentées dans une routine d'optimisation sous MATLAB[®]. Ainsi les différents paramètres des modèles sont identifiés afin d'obtenir la meilleure corrélation avec les données expérimentales des analyses DSC. La figure 1 montre une comparaison de la courbe expérimentale de DSC avec le modèle numérique couplant la polymérisation et la cristallisation

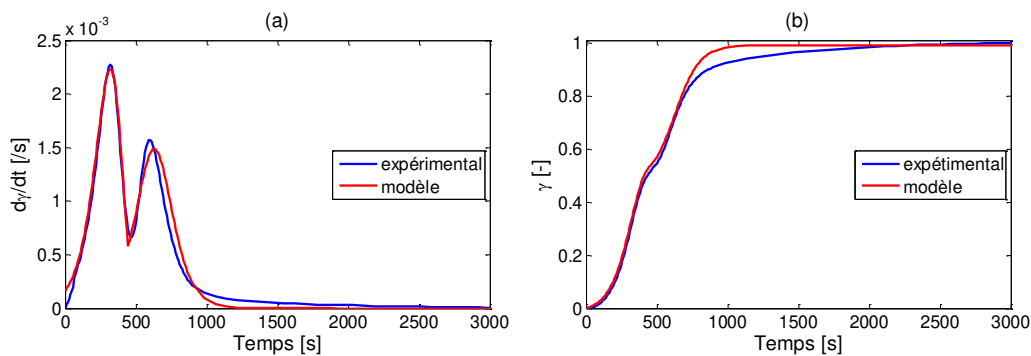


Figure 1 – Comparaison entre données expérimentales et modélisées ; (a) $d\gamma/dt$; (b) Intégrale γ

Grâce à l'identification des paramètres cinétiques, les diagrammes TTT peuvent être édités et le mécanisme réactionnel implémenté dans la simulation globale du procédé. Cette dernière se fera sous COMSOL Multiphysics[®] afin de prendre aussi en compte les problèmes liés à la mécanique des fluides (infusion, imprégnation) et aux transferts thermiques (moule, exothermie).

3. Conclusion et perspectives

L'analyse DSC couplée à une modélisation sous MATLAB[®] permet l'identification du comportement réactionnel de la résine. Une fois entièrement compris, il pourra être étayé par une analyse de l'évolution des propriétés rhéologiques. La présence des fibres est un autre paramètre important à prendre en compte. Il conviendra d'étudier leur influence sur les cinétiques de polymérisation et cristallisation. L'ensemble de ces données amènera à une simulation du procédé d'élaboration.

Références

- [1] K. Van Rijswijk, *Thermoplastic composite wind turbine blades - Vacuum infusion Technology for anionic polyamide-6 composites*, PhD thesis, Technische Universiteit Delft, 2007
- [2] K. Khodabakhshi, *Anionic Polymerisation of caprolactam: an approach to optimizing the polymerisation conditions to be used in a jetting process*, PhD thesis, Loughborough University, 2011
- [3] J. Teuwen, *Thermoplastic composite wind turbine blades - Kinetics and processability*, PhD thesis, Technische Universiteit Delft, 2011

Formage de composites thermoplastiques épais par emboutissage.

Doctorant : Lilian MARTINEAU¹

Encadrants : Gérard BERNHART², France CHABERT³, Toufik DJILALI⁴

¹ lilian.martineau@mines-albi.fr

² gerard.bernhart@mines-albi.fr, ³ france.chabert@enit.fr, ⁴ toufik.djilali@nimatech.fr

Résumé — Les matériaux composites thermoplastiques renforcés de fibres longues sont étudiés d'une manière intensive pour leur introduction dans les prochaines générations de pièces structurales pour avion. La mise en œuvre par emboutissage de pièces sans défauts de forme et de santé matière est d'autant plus délicate à maîtriser que le matériau thermoplastique se met en œuvre à haute température et que les pièces finales sont épaisses. L'objectif de cette thèse est de proposer une voie innovante de formage de composites thermoplastiques pouvant être utilisée pour mettre en œuvre des pièces structurales thermoplastiques épaisses.

Abstract — Continuous fiber Thermoplastic composites materials are studied in an intensive way in order to be introduced in the next generations of aeronautical structural parts. The composite manufacturing process by stamping of parts without shape defects and health-related materials is highly complex to control because the thermoplastic material is formed at high temperature and the final parts are thick. The goal of this thesis is to propose an innovative approach of thermoplastic stamping of composites that may be used for manufacturing of thick thermoplastic structural parts.

1. Instruction générale

Le principal défi pour atteindre les avancées promises par les composites thermoplastiques réside dans la maîtrise de la mise en œuvre et des propriétés du PEEK. Depuis une vingtaine d'années, le PEEK renforcé de fibres de carbone offre un fort potentiel pour la réalisation de structures légères hautes performances destinées à l'aérospatiale ou d'autres applications exigeantes [1]. Dans de tels domaines, quand sont exigées une haute résistance mécanique combinée à une résistance aux variations de température ainsi qu'à une résistance aux attaques chimiques, seuls des polymères de hautes performances peuvent être utilisés. Dans certains cas, ces types de polymères remplacent progressivement les alliages métalliques avec l'avantage d'être plus légers et résistants à la corrosion. Parmi eux, la famille des polyarylethercétone (PAEK) a été démontrée comme étant la matrice la plus résistante à la dégradation thermo-oxydative [2]. Néanmoins, en raison de la mise en œuvre à hautes températures et des problèmes liés au contrôle de la cristallinité, le formage de composite à base PAEK reste toujours un défi.

2. Présentation de l'étude

Dans l'industrie, le procédé d'estampage induit souvent des vitesses de refroidissement élevées conduisant à des degrés de cristallinité inférieurs aux degrés maximaux atteignables. Il est bien connu que le taux de cristallinité influence le comportement mécanique [3]. En effet, la phase cristalline, où les macromolécules sont étroitement regroupées les unes aux autres, renforce la phase amorphe [4]. En conséquence, un polymère ayant un taux de cristallinité plus élevé a un module d'élasticité dans l'état vitreux. Cette variation est d'autant marquée au-dessus de la température de transition vitreuse (T_g). Le comportement dans l'état caoutchoutique de la matrice PEEK n'a pas été largement étudié jusqu'à maintenant. Cependant, une connaissance des propriétés mécaniques dans l'état caoutchoutique conduirait une meilleure prédiction du comportement des pièces dans leur condition d'utilisation. Dans certains cas comme l'usinage des composites PEEK ou une sollicitation à haute fréquence en fatigue, la température du matériau dépasse localement sa transition vitreuse. Par conséquent, il est de

grande importance de déterminer le comportement du PEEK pour des taux de cristallinité variés. Une étude a été menée pour définir le comportement mécanique du PEEK dans l'état caoutchoutique, à un taux de cristallinité le plus faible possible proche de celui du PEEK amorphe. Différents moyens ont été mis en place tels que des essais de relaxation, montrés Figure 1. A partir des résultats obtenus, une modélisation de ce comportement va être proposée.

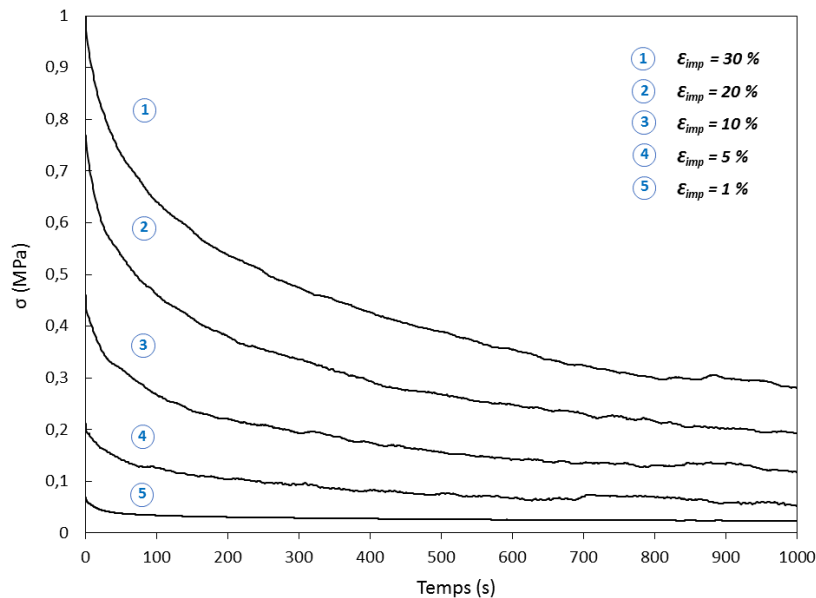


Figure 1 – Comportement en relaxation du PEEK amorphe dans l'état caoutchoutique

En parallèle de l'étude mécanique, la cristallisation à partir de l'amorphe a été investiguée. L'évolution de cristallinité avec les conditions du recuit a été définie pour une matrice PEEK amorphe. L'étude a été réalisée par diffraction des rayons X. L'avantage de cette technique est de ne pas nécessiter de chauffage durant l'analyse, garantissant de ne pas introduire d'hypothétiques réorganisations structurales, comme cela semble être le cas, de manière non détectable, pour les dispositifs thermiques [5]. La morphologie cristalline générée par le recuit va maintenant être caractérisée.

Références

- [1] P. D. Mangalgi. *Bulletion of materials science*, Vol. 22, Num. 3, Pag.657-664, 1999.
- [2] J. Tarrieu. Étude et durabilité de solutions de packaging polymère d'un composant diamant pour l'électronique de puissance haute température. Ph.D. thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2012.
- [3] N. L. Batista, P. Olivier, G. Bernhart, M. C. Rezende, E. C. Botelho. Correlation between degree of crystallinity, morphology and mechanical properties of PPS/carbon fiber laminates. *Mat. Res.* [online]. Vol.19, Num.1, Pag.195-201, 2016.
- [4] R. K. Krishnaswamy and D. S. Kalika. Dynamic Mechanical Relaxation Properties of Poly (ether Ether Ketone), *Polymer*, Vol. 35, Num. 6, Pag.1157–65, 1993.
- [5] J. Faraj et al. Crystallization Kinetics of New Low Viscosity Polyamides 66 for Thermoplastic Composites Processing, *Thermochimica Acta*, Vol. 624, Pag.27–34, 2016.

Optimisation topologique de treillis sous contraintes de flambage local et global

Doctorant : Florian MITJANA¹

Encadrants : Sonia CAFIERI², Florian BUGARIN³

¹florian.mitjana@avantis-group.com

²sonia@recherche.enac.fr, ³florian.bugarin@univ-tlse3.fr

Résumé — Nous nous intéressons à l'optimisation topologique de structure de type treillis sous des contraintes de rigidité et de flambage global et local. Nous considérons que la structure est constituée de barres encastrees, permettant la transmission de l'intégralité des efforts et des moments d'une barre à l'autre. Après avoir formulé le problème sous la forme d'un problème d'optimisation non-linéaire en variables mixtes, nous proposons un algorithme optimisant les dimensions des sections transversales des barres et supprimant les éléments de la structure par des critères de sensibilité mécaniques.

Abstract — We are interested in topological optimization of truss-like structures under stress and global and local buckling constraints. We consider that the structural members are frame elements, allowing the transmission of the entire efforts from one bar to the other. We formulate of the problem as a mixed-integer non-linear optimization problem, and then we propose an algorithm optimizing the bars' cross sectional dimensions and deleting the elements of the structure by criteria of mechanical sensibilities.

1. Contexte

Depuis les années soixante, l'optimisation topologique de structure de type treillis est un sujet qui fait l'objet d'intenses recherches. Notre étude porte sur des problèmes mêlant des contraintes de rigidité et de flambage local et global. Une structure de type treillis est caractérisée par un nombre n des barres et par m nœuds connectant ces barres. Généralement, on considère que les éléments de la structure ne supportent que des forces axiales et sont donc soumises uniquement à des déplacements axiaux. Dans notre étude, nous supposons que les liaisons internes entre les barres sont des encastremements, transmettant ainsi des forces axiales et tranchantes mais aussi des moments fléchissant et de torsion. Cette approche permet d'avoir une meilleure analyse des déformations subies par la structure mais augmente en contrepartie le coût de calcul puisque pour chaque nœud, en plus des 3 degrés de liberté liés aux déplacements, nous devons en ajouter 3 autres concernant les axes de rotations.

Dans le domaine élastique, le facteur de chargement critique de flambage λ_{cr} correspond à la plus petite valeur propre positive du problème aux valeurs propres suivant :

$$(K_e + \lambda K_g) v = 0 \quad (1)$$

où K_e est la matrice de rigidité élastique, K_g est la matrice de rigidité géométrique linéarisée, λ sont les facteurs de chargement de flambage et v représentent les différents modes de déformations de la structure. Ainsi, pour s'assurer que cette dernière ne flambe pas sous les efforts appliqués, nous devons nous assurer que le facteur de chargement critique λ_{cr} soit supérieur ou égal à 1 [1].

2. Problème d'optimisation et résolution

On formule le problème comme un problème d'optimisation non-linéaire en variables mixtes, où nous supposons que le treillis est constitué de n barres :

Les variables de décision du problème sont : $\forall i = 1, \dots, n$, p_i indique la présence ou non de la barre i , et d_i représentant les dimensions de la section transversale de cette barre.

$$sc : \begin{cases} \min_{(p_1, d_1, \dots, p_n, d_n)} M(p_1, d_1, \dots, p_n, d_n) = \sum_{i=1}^n \rho * L_i * p_i * A(d_i) \\ \sigma_i^{VM}(p_1, d_1, \dots, p_n, d_n) \leq \bar{\sigma} \quad \forall i = 1, \dots, n & \text{contraintes de rigidité} \\ 1 \leq \lambda_{cr}(p_1, d_1, \dots, p_n, d_n) & \text{contraintes de flambage} \\ D_{min} \leq d_i \leq D_{max} \quad \forall i = 1, \dots, n & \text{bornes sur les dimensions} \\ p_i \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

où M représente la masse de la structure, ρ est la densité du matériau, L_i est la longueur de la barre i , $A(d_i)$ est l'aire de la section transversale de la barre i , σ_i^{VM} correspond à la contrainte de Von Mises dans la barre i , $\bar{\sigma}$ la limite de rigidité du matériau, λ_{cr} est le facteur de chargement critique calculé à l'aide de l'équation (1) et D_{min} et D_{max} sont les bornes minimales et maximales pour les dimensions des sections des barres. Pour résoudre ce problème, nous proposons de traiter séparément les variables binaires et les variables continues en alternant les deux étapes suivantes. La première phase consiste à fixer les variables p et à l'aide de l'algorithme SQP, nous optimisons les dimensions des sections transversales des barres. La seconde étape va permettre de supprimer la barre qui a le moins d'influence sur le facteur de chargement critique λ_{cr} et n'entraîne pas une augmentation de la somme des contraintes de rigidité, parmi les barres dont les dimensions des sections transversales ont atteint les bornes minimales.

3. Application numérique

Dans l'exemple suivant [2], nous étudions une structure en forme de L (Figure 1) composée initialement 86 barres soumise à une force F de 400 kN. Les sections transversales des barres sont des carrés creux dont nous optimisons la hauteur et l'épaisseur. On considère comme matériau de l'acier, définissant le module de Young E à 210 000 MPa, le coefficient de poisson ν à 0.3, la densité ρ à 0.00785 g/mm^3 et la limite de rigidité $\bar{\sigma}$ à 210 MPa. La solution obtenue (Figure 2) est composée de 13 barres pour une masse de 245.25 kg et un facteur de chargement critique λ_{cr} de 1.

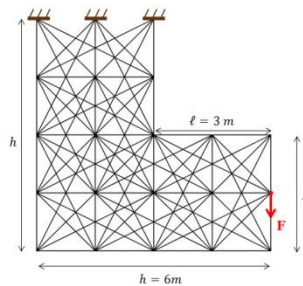


Figure 1 – Structure en L initiale

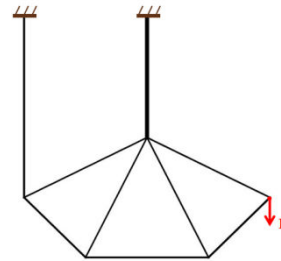


Figure 2 – Solution obtenue

Références

- [1] A.J. Torii et al. Modeling of global and local stability in optimization of truss-like structures using frame elements, *Struct Multidisc Optim*, Vol. 51, Pag.1187-1198, 2015.
- [2] K. Mela. Resolving issues with member buckling in truss topology optimization using a mixed variable approach, *Struct Multidisc Optim*, Vol. 50, Pag.1037-1049, 2014.

Propagation Inverse d'Incertitudes, Applications en Génie Mécanique

Doctorant : Iman ALHOSSSEN¹

Encadrants : Stéphane SEGONDS², Florian BUGARIN³.

¹ iman.alhossen@univ-tlse3.fr

² stephane.segonds@univ-tlse3.fr, ³ florian.bugarin@univ-tlse3.fr.

Résumé — La propagation d'incertitude a été le sujet de plusieurs études. La propagation directe de l'incertitude a été largement considérée de cette manière, mais peu d'inquiétude a été payée pour l'inverse propagation. Dans cette thèse, nous essayons de tirer une nouvelle méthode d'inverse propagation d'incertitude pour gérer les incertitudes lors de la modélisation. Domaines dans lesquels nous allons appliquer notre méthode peut inclure l'ingénierie mécanique et la vision par ordinateur.

Abstract — Uncertainty Propagation has been the topic of several studies. The forward propagation of uncertainty was extensively considered in this manner, however little concern was paid for the backward propagation. In this thesis, we try to derive a new backward uncertainty propagation method to handle uncertainties during modeling. Domains in which we are going to apply our method may include mechanical engineering and computer vision.

1. Content

When dealing with uncertainty, usually a model with input and output is considered. In the forward propagation of uncertainty, the output's uncertainty due to the input's uncertainty is studied. However, in the backward propagation, given the uncertain output, different inferences can be investigated. For instance, in the case of having uncertain inputs or parameters, backward uncertainty propagation with the uncertain output helps tighter the uncertain bounds of the inputs. Moreover, calibration and estimating unknown parameters can be done using backward propagation methods. In addition, when structural uncertainty is presented, inverse propagation of uncertainty leads to a model update aiming to reach a satisfied structure of the model.

The forward propagation of uncertainty was extensively considered in this manner, however little concern was paid for the backward propagation. In this thesis, we try to derive a new backward uncertainty propagation method to handle uncertainties during modeling. To this end, one should start first with some preliminaries. So we started by studying several forward propagation methods, to enhance our bibliographical back ground and thoroughly comprehend the concepts of uncertainty. This include probabilistic and non-probabilistic methods, such as Monte Carlo method, Spectral Method, fuzzy set theory, and possibility theory. In addition to this, it was also important to pay attention for different concepts that highly benefit our study of uncertainty. In this manner, we focus on sensitivity analysis methods [1], and in particular on the Sobol Method. Indeed, in sensitivity analysis we study how the variation in the output can be apportioned to the variation of the inputs. This leads to the determination of how the output is dependent on each of the inputs. Thus sensitivity analysis helps in detecting the important and the non-important inputs, hence point out where to pay more attention during uncertainty quantification.

To practically understand the concepts of sensitivity analysis, we did two applications. The first application was in the domain of Electro static force, in collaboration of LAPLACE laboratory. We study the sensitivity analysis of the Electrostatic Force Distance Curves (EFDC), where the EFDC are curves formed by an atomic force microscopy, a scanning probe microscopy technique. In this application we used Sobol Method to find the Sobol indexes of the input variables. Since the case we were dealing with comes from experiments, we used also Factorial Design of Experiment (DOE) to study the effect of the input variables on the output. The factorial plots were used, Main effects were detected as well as the interaction effects of the inputs. Results from both methods were compatible. In a second application, we applied Sobol method to study the sensitivity of depth in a 3D reconstruction procedure called SFT. Indeed, SFT [2] stands for shape From Template, it is the way in which a 3D deformed object is reconstructed using a template and one single 2d image. Our work in this application was jointly with Adrien Bartoli, Prof at Auvergne University, and we are in the way of getting the expected results.

Expecting that we built a broad and rich background about how to deal with uncertainties, we are preparing right now to outline a new backward uncertainty propagation method. Our thoughts goes to derive a general method, aiming after to test it with applications in different domains.

2. References

- [1] A. Saltelli, P. Annoni, I. Azzini, F. Campolongo, M. Ratto, S. Tarantola, Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index *Computer Physics Communications* 181, 259–270, (2010)
- [2] A. Bartoli, Y. Gérard, F. Chadebecq, T. Collins, D. Pizarro, Shape-from-Template, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Accepted January (2015).
- [3] C. Villeneuve-Faure, L. Boudou, K. Makasheva, and G. Teyssedre, Towards 3D charge localization by a method derived from atomic force microscopy: the electrostatic force distance curve, [Journal of Physics D: Applied Physics](#), [Volume 47](#), Number 45, (2014).

Modèles thermiques pour la conception préliminaire d'actionneurs et de systèmes électriques

Doctorant : Florian SANCHEZ¹

Encadrants : Marc BUDINGER², Ion HAZYUK³

¹ florian.sanchez@insa-toulouse.fr

² marc.budinger@insa-toulouse.fr, ³ ion.hazyuk@insa-toulouse.fr

Résumé — Les travaux présentés ici concernent le développement d'une méthode d'obtention de méta-modèle, intitulée Variable Power Law Meta-model, qui combine l'analyse dimensionnelle et les techniques de surfaces de réponses. La méthode proposée génère des modèles où les variables employées sont des nombres adimensionnels ce qui permet d'intégrer du sens physique au sein du modèle mathématique. Cette méthode a permis de construire des modèles thermiques d'actionneur et de systèmes électriques qui ont été utilisés pour leur conception préliminaire.

Abstract — The work presented here concerns the development of a surrogate modelling technique, named Variable Power Law Meta-model, which combines the dimensional analysis and the response surface methodology. The proposed method generates models where the used variables are dimensionless numbers which integrates some physical meaning into the mathematical model. This method was used to build thermal models of actuators and electrical systems which were used for their preliminary design.

1. Introduction, Contexte

Dans l'aéronautique, la distribution et la transformation de l'énergie à bord de systèmes embarqués devient de plus en plus électrique. Malgré ses avantages par rapport aux technologies hydrauliques, cette technologie garde aussi ses propres défauts, en l'occurrence les fortes contraintes liées à la thermique. Ceci impose la prise en compte de contraintes thermiques lors du dimensionnement, qui peuvent s'avérer critiques dans certains cas. La phase d'intérêt des travaux effectués durant cette thèse est celle de la conception préliminaire qui fait le lien entre les spécifications issues du cahier des charges et la conception de détail en évaluant et comparant différentes solutions pour le système étudié. Les modèles d'estimation utilisables en conception préliminaire requièrent de présenter une forme mathématique qui est simple à manipuler et à mettre en œuvre dans les différents outils de calcul. Toutes ces contraintes nous ont amené à développer une méthode d'obtention de modèles thermiques pour la conception préliminaire d'actionneurs et de systèmes électriques : la méthode VPLM. Cette méthode qui emprunte des concepts émanant de différents domaines de la mécanique, a nécessité de développer une méthode de génération de plan d'expériences spécifique et de prévoir la mise en place d'outils d'analyses mathématiques qui pourront servir de support lors de l'utilisation de cette méthode.

2. La méthode VPLM : « Variable Power Law Meta-model »

La méthode VPLM s'appuie sur trois différentes approches pour proposer un processus de génération de modèles thermiques en accord avec les contraintes auxquelles doit faire face le concepteur d'un système. La méthode utilise donc l'analyse dimensionnelle [1] pour réduire le nombre de variables du système étudié tout en conservant sa physique, les lois en puissance comme forme mathématique de base pour les modèles car elles sont aussi la base des lois de corrélation en transferts

thermiques [2], et les techniques de méta-modèles [3] pour construire les modèles à partir de simulations éléments finis. Les étapes du processus d'obtention des modèles VPLM est illustré dans la Figure 8. La forme mathématique de base proposée pour la méthode VPLM est une loi en puissance où les coefficients de puissance peuvent être fonction des nombres adimensionnels :

$$\pi_0 = k \pi_1^{\alpha_1(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)} \pi_2^{\alpha_2(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)} \dots \pi_n^{\alpha_n(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)} \quad (1)$$

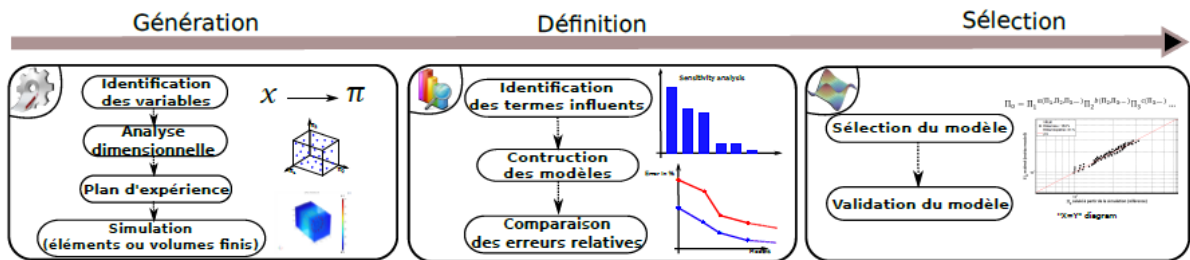
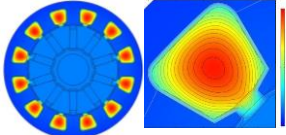
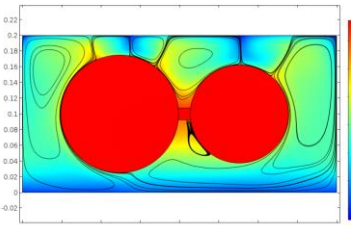
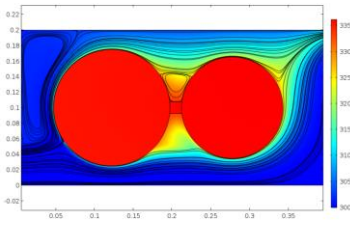


Figure 8 : Processus de la méthode VPLM

3. Conception préliminaire d'un actionneur électromécanique d'aileron

Les premiers résultats obtenus quant à l'utilisation de la méthode VPLM sont la génération de modèles d'estimation pour la conception préliminaire d'un actionneur électromécanique d'aileron d'un aéronef pour différentes stratégies de refroidissement. Le Tableau 3 présente les modèles éléments finis et les modèles thermiques construits en utilisant la méthode VPLM.

Tableau 3 : Modèles thermiques d'un actionneur électromécanique d'aileron

Résistance thermique conductive d'un moteur électrique brushless	Résistance thermique d'un carter d'actionneur refroidit par convection naturelle	Résistance thermique d'un carter d'actionneur refroidit par convection forcée
		
$R_{cd} = \frac{317.7}{\lambda_{iron} L_m} \pi_1^{-1.57+0.25 \log(\pi_1)}$	$R_{nc} = \frac{66.8}{\lambda L_s} \pi_1^{2.91+2.95 \log(\pi_2)+1.67 \log(\pi_1)+1.72 \log(\pi_1) \log(\pi_2)} \pi_2^{2.06+0.51 \log(\pi_2)} Gr_{L_s}^*^{-0.19}$	$R_{fc} = \frac{0.225}{\lambda L_s} \pi_1^{0.239+2.46 \log(\pi_2)-1.96 \log(\pi_1) \log(\pi_2)} \pi_2^{0.44} Re^{-0.9}$

Références

- [1] T. Szirtes and P. Rózsa, *Applied Dimensional Analysis and Modeling*. 2007.
- [2] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, vol. 6th. John Wiley & Sons, 2007.
- [3] A. I. J. Forrester, A. Sóbester, and A. J. Keane, *Engineering Design via Surrogate Modelling*. 2008.

Amélioration des méthodes de prédiction du glissement de liaisons vissées dû à des chargements vibratoires et thermoélastiques

Doctorant : Rémi THANWERDAS¹

Encadrants : Alain DAIDIE², Emmanuel RODRIGUEZ³

¹ remi.thanwerdas@email.fr

² alain.daidie@insa-toulouse.fr, ³ emmanuel.rodriquez@icam.fr

Résumé — Cette thèse s'intéresse à l'amélioration des méthodes de dimensionnement de modèles simplifiés de liaisons vissées (éléments ressorts, poutres ou barres), notamment pour le secteur spatial. Un modèle 3D détaillé de liaison vissée générique a été développé à l'aide d'un logiciel de calcul par éléments finis. Une approche par plans d'expériences numériques multi-échelles a permis d'évaluer des métamodèles de raideur et de glissement en fonction des paramètres géométriques, matériaux et de contact de la liaison. Les métamodèles issus de ces travaux numériques ont été confrontés et corrélés à des essais expérimentaux de double-cisaillement.

Abstract — This thesis focuses on improving the design methods for simplified models of screwed connections (spring, beam or bar elements), especially for the space sector. A detailed 3D model of a generic screwed connection has been developed using industrial finite elements software. An approach based on multiscale numerical designs of experiments was used to obtain metamodels of stiffness and slip depending on geometric, material and contact parameters. Metamodels from these numerical works were compared and correlated with experimental double shear tests.

1. Contexte

Dans l'industrie spatiale, des modèles éléments finis sont systématiquement utilisés pendant le processus itératif de dimensionnement d'une structure. Les liaisons vissées y sont représentées de façon très simplifiée par des ressorts de raideurs identiques pour toutes les liaisons. Ces raideurs sont souvent surestimées, ce qui peut engendrer des efforts élevés dans les liaisons et donc un surdimensionnement. Par ailleurs, à l'issue des analyses numériques, les efforts dans les liaisons sont injectés dans des marges de calcul permettant de valider ou non le design. Actuellement, aucun glissement n'est accepté à l'interface des pièces serrées [1]. Or, une certaine tolérance au glissement est possible dans certaines liaisons, selon leur criticité. Il s'agit ici de proposer, pour le cas de cisaillement dans le plan, des modèles de raideur et de glissement permettant de prendre en compte ces exigences assouplies en se basant sur un comportement plus réaliste des liaisons vissées. Afin de modéliser correctement le glissement, une prise en compte du comportement microscopique des interfaces de contact est nécessaire. Ainsi, un modèle de fretting a été sélectionné dans la littérature, adapté puis utilisé dans cette étude. Il s'agit du modèle Eriten-Polycarpou-Bergman (EPB) [2].

2. Etude numérique d'une liaison vissée générique

Afin d'identifier des modèles de raideur et de glissement, un modèle paramétrique 3D statique non-linéaire de liaison vissée générique a été développé (Figure 1) Le contact entre les pièces est défini par un modèle de Coulomb équivalent, identifié à partir du modèle microscopique EPB [2].

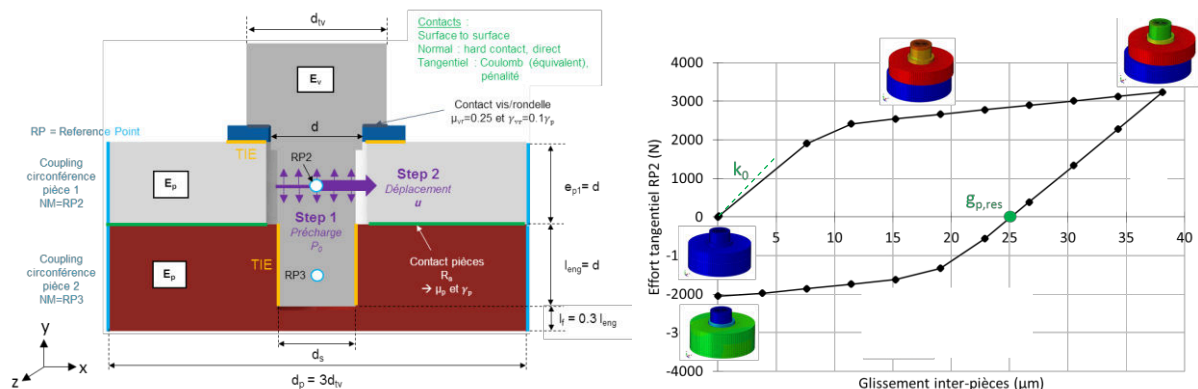


Figure 1 – Modèle numérique (gauche) et courbe de comportement typique (droite)

Cinq paramètres d'entrées sont étudiés : le diamètre de la vis, les modules de Young des matériaux des pièces et de la vis, la rugosité du contact entre les pièces serrées et l'amplitude du déplacement imposé. Ces paramètres alimentent un plan d'expériences de type surface de réponse. A l'issue du dépouillement des résultats, des métamodèles de raideur et de glissement (Figure 1) ont été identifiés.

3. Essais de double-cisaillement

Des essais de double-cisaillement ont été réalisés (Figure 2) afin de confronter les métamodèles issus de l'étude numérique à des résultats expérimentaux. Plusieurs configurations ont été testées.

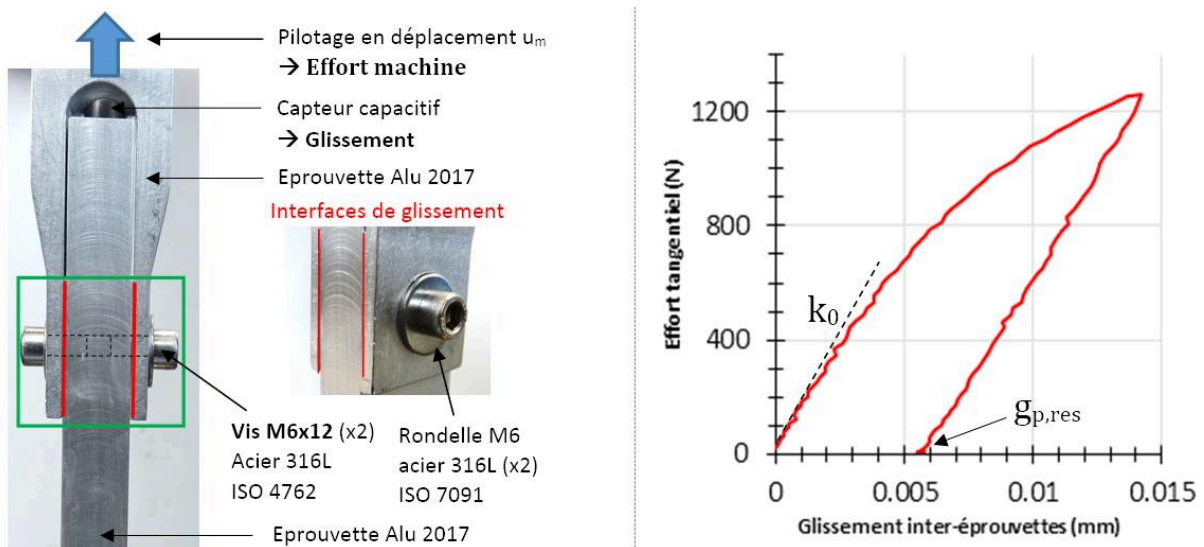


Figure 2 – Essais de double-cisaillement (gauche) et courbe de résultats typique (droite)

Le métamodèle de raideur est en très bonne corrélation avec les résultats d'essais, avec des écarts relatifs inférieurs à 5%. Le métamodèle de glissement résiduel montre quant à lui une bonne corrélation, avec des écarts relatifs inférieurs à 25%.

Références

- [1] ESA Requirements and Standards Division. *ECSS-E-HB-32-23A, Threaded fasteners handbook*, 2010.
- [2] Eriten, M., Polycarpou, A. A., Bergman, L. A. Physics-based modeling for fretting behavior of nominally flat rough surfaces, *International Journal of Solids and Structures*, 48(10), 1436-1450, 2011.

Développement de ressort non linéaire pour le pompage énergétique

Doctorant : Donghai QIU¹

Encadrants : Manuel PAREDES², Sébastien SEGUY³

¹ qiu@insa-toulouse.fr

² paredes@insa-toulouse.fr, ³ seguy@insa-toulouse.fr

Résumé — La réduction des vibrations est une thématique de recherche en évolution notamment depuis l'apparition des absorbeurs innovants de type Nonlinear Energy Sink (NES). Ce type d'absorbeur est caractérisé par une masse secondaire fortement couplée par l'intermédiaire d'une raideur non linéaire à la structure principale à protéger. La maîtrise de la non-linéarité est un élément clef pour l'obtention de performance optimale. Cependant, en pratique il est difficile d'obtenir une raideur cubique sans partie linéaire. Dans cet article, nous présentons un nouveau design de NES conduisant à l'obtention d'une raideur cubique.

Abstract — The reduction of vibrations is a thematic evolution research particularly since the emergence of innovative absorbers Nonlinear Energy Sink (NES). This type of absorber is characterized by a secondary mass highly coupled via a non-linear stiffness to the main structure that needs to be protected. The mastery of the nonlinearity is a key element for obtaining optimum performance. However, in practice it is difficult to obtain a cubic stiffness without linear part. For this, a novel NES design leading to the award of a cubic stiffness is presented.

1. Instructions

Vibration mitigation devices are required more rigorous with the modern mechanical products designed faster, lighter and more sophisticated. Particularly in the aeronautics and space, it requires the absorber be light, and have a broad spectrum of frequency. The traditional linear absorber is hard to achieve these requests, thus introducing the nonlinear absorber nonlinear energy sink (NES) seems to be a good way. This type of absorber is characterized by a secondary mass highly coupled via a nonlinear stiffness to the main structure that needs to be protected. And it has demonstrated that this system with strongly nonlinear element is able to absorb and dissipate the energy efficiently from the main structure [1].

The mastery of the nonlinearity is a key element for obtaining optimum performance. Depending on the type of nonlinearity, different kinds of NES have been proposed: oscillating dissipative with pure cubic stiffness, piecewise stiffness, rotational elements and sinks undergoing vibro-impacts. As far as the pure cubic NES, it has been shown that this configuration is most effective at moderate-energy regimes. Yet in practice it is difficult to obtain a cubic stiffness without linear part. In our recent approaches, the essential cubic stiffness was mostly realized by adopting the construction of two springs with no pretension [2]. However, this type may not be suitable for practical application, due to its large size; in addition, a relatively weak nonlinear stiffness exists at the beginning extension, leads to the cubic term approximated to a linear term. Therefore, how to implement cubic stiffness elements practically is still an important issue to broaden the application of NES.

2. Research work

A novel design NES of cubic stiffness without linear part is developed. For this, two conical springs are specially sized to provide the polynomial components only with linear and cubic term. To counterbalance the linear term, the concept of negative stiffness mechanism is proposed by two cylindrical compression spring. A small sized NES system providing strongly nonlinear stiffness is developed and presented in Fig.1, of which the distance of spring is adjustable so to reach the suitable force shape.

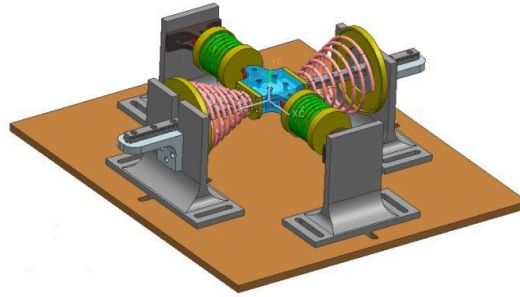


Figure 1–Assembly of NES system

To validate the concept, the load-displacement relation test is performed, and the simulation of a harmonically excited linear oscillator coupled to this type of NES is studied. The results show that this structure can output the pure cubic stiffness as expected; at the specified period excitation amplitude (Fig.2), this system could passively transfer the unwanted disturbance energy with the response of strongly modulated response (SMR); at transient loading (Fig.3), this type can dissipate targeted energy irreversibly with the speed of vibration extinction of LO following a quasi-linear decrease.

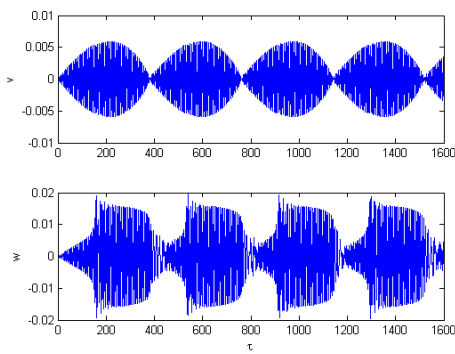


Figure 2–SMR

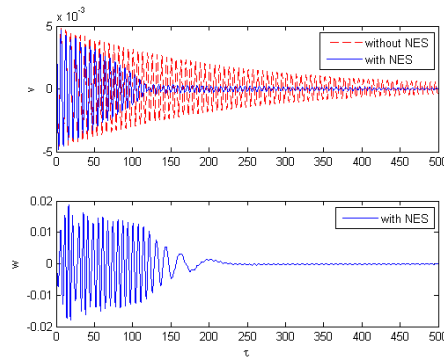


Figure 3–Transient response

Future developments will aim experimental validation, and the application of passive vibration control in spatially flexible structures.

Références

- [1] Vakakis A F, Gendelman O V, Bergman L A, et al. Nonlinear targeted energy transfer in mechanical and structural systems[M]. Springer Science & Business Media, 2008.
- [2] McFarland D M, Bergman L A, Vakakis A F. Experimental study of non-linear energy pumping occurring at a single fast frequency[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2005, 40(6): 891-899.
- [3] Rodriguez E, Paredes M, Sartor M. Analytical behavior law for a constant pitch conical compression spring[J]. Journal of Mechanical Design, 2006, 128(6): 1352-1356.

Limit load estimation using Gaussian Process Regression

Doctorant : Ankit CHIPLUNKAR¹

Encadrants : Emmanuel RACHELSON², Michele COLOMBO³, Joseph MORLIER⁴

¹ ankit.chiplunkar@airbus.com

² Emmanuel.RACHELSON@isae.fr, ³ michele.colombo@airbus.com, ⁴ joseph.morlier@isae-superaero.fr

Abstract - Precise values of flight loads are highly useful information at several stages of an aircraft's life cycle. Aircraft flight loads are often difficult and expensive to measure experimentally. This calls for a need to develop a theoretical framework to merge different types of measurements and produce a robust flight loads surrogate model. We use a machine learning technique called Gaussian process regression to statistically learn a flight loads model. The main contribution of this thesis is merging of information present in flight-physics into the science of machine learning and applying them to huge amount of data.

1. Introduction

The main difference between the Engineering design and machine learning can be explained by the difference between deduction and induction. Engineering design is deduction: where a very general formula is applied to a particular case. The basics of Newtonian physics when applied to particular aircraft geometry give inertial loads. The basics of aerodynamics when applied to particular set of aircraft geometry and aircraft states spin out aerodynamic pressures. Physical sciences take global rules and apply them to local configurations, whereas machine learning is induction. It looks at local features and data, tries to find similarity measures between them and gives a global formula for the environment. For this reason machine learning algorithms perform better in presence of more and more data [1, 4].

This difference is amplified by the fact that obtaining high-fidelity data in engineering design is a costly process. An accurate CFD simulation runs for days and cost of flight-tests run in millions. This means that we need to be data efficient and exploit the prior knowledge we have in terms of general physics-based principles. We use Gaussian process regression to learn the relation between aircraft parameters and flight-loads [1]. We then show that the Gaussian process framework can be extended to incorporate physics based prior knowledge and help in creating better models, identifying faulty measurements and making predictions [2].

2. Gaussian Process Regression

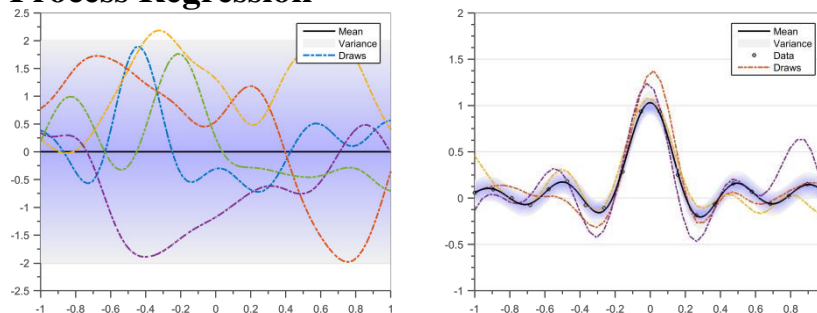


Figure 9: Gaussian Process Regression

Any regression algorithm starts with an initial family of functions or hypothesis space. By initially defining a family of functions we indirectly encode initial assumptions or bias (continuity, differentiability etc.) into our regression algorithm. A Gaussian Process is a probability distribution

over infinitely many points, such that any finite subset of the process is a multi-variate gaussian distribution [1, 4]. We use a Gaussian process to define an initial family of functions, as a next step we take the data and eliminate all functions from our family that do not pass through our observations figure 1. The Mean and the variance estimates can be given by the equation 1.

$$m(y_*) = k_{x_*,x}(K_{xx} + \sigma_{noise}^2 I)^{-1}y$$

$$Cov(y_*) = k_{x_*,x_*} - k_{x_*,x}(K_{xx} + \sigma_{noise}^2 I)^{-1}k_{xx,*}$$

Equation 1: Mean and variance estimates

3. Physics-based Gaussian Process Regression

Suppose we measure multiple outputs during a simulation or experiments and we have a prior information about the physics based relation between them equation 2. We can now construct a joint family of function for the two outputs such that a random function from one family gives a correlated draw based on our relation.

$$f_1 = g(f_2, x_1)$$

Equation 2: Relation between outputs

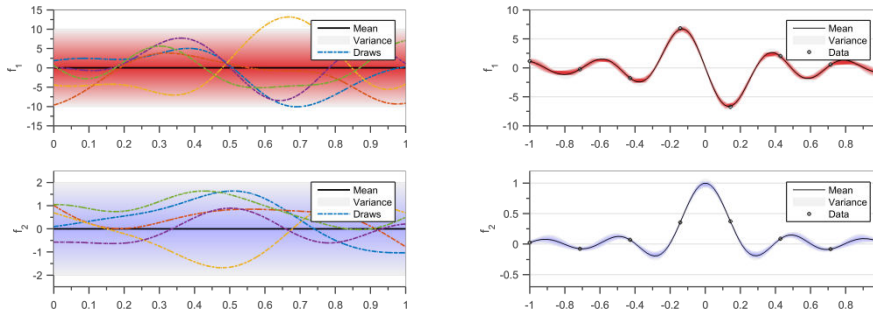


Figure 10: Imposing a differential relationship between outputs

In figure 2 we have imposed a differential relation between the outputs and first part of figure 2 shows correlated random draws from our family of functions. In the second part we see how impossible functions are eliminated upon information of data. Figure 2 shows a demonstration of how we proceed to perform a Gaussian process regression which is consistent with our physics based relation and observed data.

5. Conclusion

To conclude we have demonstrated a method to impose prior known relations in terms of physics into a Gaussian process regression framework. During the presentation we will demonstrate how this methodology is used in identifying load values on Horizontal tail plane. The approach shows improvements in prediction capabilities and handling of missing data. We are now capable of creating a more robust, physically consistent and interpretable surrogate model for these loads, thereby greatly improving the identification process.

References

- [1] Rasmussen, Carl Edward. "Gaussian processes for machine learning." (2006).
- [2] Constantinescu, Emil M., and Mihai Anitescu. "Physics-based covariance models for Gaussian processes with multiple outputs." (2013).
- [3] Allen, Michael J., and Ryan P. Dibley. "Modeling aircraft wing loads from flight data using neural networks." (2003).
- [4] Stein, Michael L. *Interpolation of spatial data: some theory for kriging*. Springer Science & Business Media, 2012.

Aeroelastic modelling of flap track fairing excited by turbofan efflux

PhD Candidate : Elisa BOSCO¹

Supervisors : Nicolas GOURDAIN², Joseph MORLIER³

¹ *Elisa.BOSCO@isae.fr*

² *Nicolas.GOURDAIN@isae.fr*, ³ *Joseph.MORLIER@isae.fr*

Abstract - The interaction between inertial, elastic and aerodynamic forces for structures subjected to a fluid flow may cause unstable coupled vibrations that can endanger the structure itself. Predicting these interactions is a time consuming but crucial task in an aircraft design process. A method for a fast nonlinear transient fluid structure interaction is developed. Reduced order models in both aerodynamic (Proper Orthogonal Decomposition) and structural (Component Mode synthesis) models are used to gain computation time. Structural complexities, such as non-linearities, are reintroduced after the reduction process. The methodology is applied on a specific component of a specific aircraft, the A380 the flap track fairing. It is proved that a combination of structural and aerodynamic reduced order models, interpolation techniques, and an efficient aero-structure data exchange can provide a fast method to estimate non-linear fluid structure interaction during transient response.

1. Introduction

Aircraft fairings are structures that, having primarily an aerodynamic function, might be subject to vibrations arising from a very disturbed flow induced by engine efflux. In the past the vibrational loads were not considered for High-Lift design. With more flexible structures and bigger engines vibrations on High-Lift systems become more severe. No solutions available at the moment to accurately predict vibrational loads considering the relevant non-linear effects (frictions and contacts). The Flap Track Fairing is used as a case of study to develop a methodology for fluid structure interaction simulations aiming at an optimal design of the structure with regards to vibration issues. Since fluid-structure interaction problems require the solution of the coupled equations of both the fluid and the structure and this can be computationally highly intensive, both the structural and aerodynamic models will be reduced using the appropriate technique.

2. Fluid structure interaction simulation method

This work focuses on the global problem of interaction of the fairing and the jet flow, an aerodynamic force will push the fairing away from the center of the jet stream while a structural repealing force will act to put the fairing back into its design position. The nonlinear structural solver is MSC Nastran® with the Sol 400, it has been chosen because of its capability to represent the induced contact areas. It is coupled through an efficient C++ interface to a database of pressures generated through Computational Fluid Dynamics simulations of RANS type and post-processed through a Python-based reduction toolkit. The huge amount of data exchanged in between the two models would make the simulation extremely time-consuming therefore the choice is to draw upon reduced order models. In structural terms a reduced order model translates into Component Mode Synthesis (CMS). On the other hand a limited number of Reynolds Average Navier Stokes (RANS) steady aerodynamic

simulations are performed with the elsA® solver to create a database of pressures on the FTF skin at different positions in its displacement envelope. The dimension of the database is then reduced through Singular Value Decomposition (SVD) on the basis of the energetic content of the singular values. The aerodynamic load at any position of the FTF is then drawn from the reduced set of data through interpolation, see Figure 1. An alternate method to determine the pressure distribution on the FTF at any position is developed using the GPML Matlab® toolbox where a Gaussian process is used for Bayesian supervised learning in prediction mode.

3. Experimental verification

In order to validate the developed methodology a test campaign in a wind tunnel has been designed. The mock-up to be tested is a plate that is free to rotate around one single axis. This plate is mounted in the wind tunnel where a wedge is placed to restrict the jet. The mock up, placed with a non-zero angle with respect to the longitudinal symmetry axis of the test section, will be excited on its only degree of freedom by the discontinuities in the so developed flow, see Figure 2.

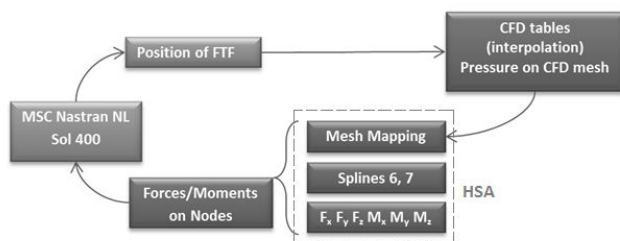


Figure 11 - FSI loop

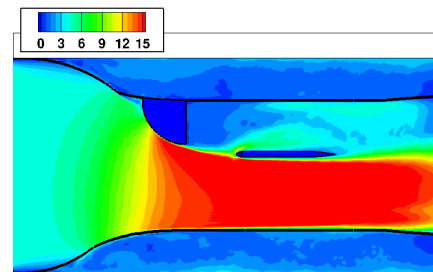


Figure 12 - Test set

5. Perspectives

This study attempts to answer to the complex industrial problem of efficiently simulating fluid structure interaction when structural non-linearities at contact play a relevant role and the simulation time acts as a major constraint. Since this peculiar multidisciplinary problem cannot be solved with the standard tools the outcome will be a new fast method to couple fluid and structure when structural non-linearities cannot be neglected. The use of both structural and aerodynamic reduced order models allows extracting the predominant parameters gaining efficiency and maintaining the desired level of accuracy. The first application to the aeroelastic response of FTF subjected to a simplified aerodynamic excitation aims at testing the methodology and not at making predictions on the real behaviour of the FTF. It can be inferred that the tool developed is suitable to simulate nonlinear fluid structure interaction. This approach has to be validated using wind tunnel test data.

Références

- [1] Ghosh, T., Component mode synthesis of structures with geometric stiffening in MSC/Nastran, MSC, 1999
- [2] D Amsallem, C Farhat, An Interpolation Method for Adapting Reduced-Order Models and Application to Aeroelasticity, AIAA journal, 2008
- [3] Sandboge, R., Fluid-structure interaction with OpenFSI TM and MD Nastran TM structural solver, MSC Software Corporation, 2010
- [4] Farhat, C., Lesoinnea, M., LeTallec, P., Load and motion transfer algorithms for fluid/ structure interaction problems with non-matching discrete interfaces: Momentum and energy conservation, optimal discretization and application to aeroelasticity, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering Volume 157, Issues 1–2, 1998.

Modèle vibratoire de réservoir cryotechnique de lanceur : définition d'un méta-matériau équivalent

Doctorant : Pierre-Louis CHIAMBARETTO¹

Encadrants : Philippe VILLEDIEU², Miguel CHARLOTTE³

¹ pierre-louis.chiambaretto@isae.fr

² philippe.villedieu@onera.fr, ³ miguel.charlotte@isae.fr

Résumé — Les ergols liquides cryogéniques, et notamment l'hydrogène liquide (LH2), sont intéressants pour la propulsion des lanceurs. Néanmoins, en raison de leur dangerosité, les essais vibratoires sur des réservoirs pleins de LH2 sont impossibles. En vue de permettre l'étude des réservoirs de LH2 des prochaines générations de lanceurs, cette thèse a pour objectif d'approcher le comportement modal d'un réservoir rempli de fluide par celui de ce même réservoir rempli d'un milieu granulaire précontraint. Des approches expérimentales, numériques et semi-analytiques sont utilisées afin de déterminer les propriétés matériaux, géométriques et de précontraintes.

Abstract — Cryogenic liquid propellants include liquid hydrogen (LH2) are interesting for launch vehicle propulsion. Although, vibration tests on filled tank with LH2 are impossible for safety reasons. In order to allow the study of LH2 tanks next generation launchers, this PhD aims at approaching the modal behavior of a fully-filled liquid tank by the behavior of that same tank fully-filled with a prestressed granular medium. Experimental, numerical, and semi-analytical approaches are used to determine the material, geometric and prestressed properties

1. Introduction

Les ergols liquides, en particulier le couple oxygène liquide (LOX), hydrogène liquide (LH2), ont une impulsion spécifique importante qui permet d'obtenir de très bonnes performances pour les lanceurs. Cependant, de nombreux problèmes techniques rendent difficile le développement de tels moteurs. L'un des problèmes est le stockage des ergols cryogéniques et l'étude du comportement dynamique du réservoir. En raison de leurs complexités et dangerosité, les essais vibratoires ne peuvent être réalisés avec ces fluides. Pour le LOX un fluide de substitution constituée principalement d'eau qui a des propriétés mécaniques assez proche est utilisé. Concernant le LH2, cette approche ne peut être employée à cause de sa faible densité (72 kg/m^3).

L'idée de la thèse est de remplacer le fluide par un milieu granulaire précontraint en compression composé de billes creuses pour les essais vibratoires. L'objectif est d'obtenir des déformées et des fréquences propres semblables pour les premiers modes, dans le cas d'un réservoir cylindrique. Pour ce faire, il faut comprendre le lien entre les propriétés du milieu granulaire, du réservoir et du fluide que l'on souhaite étudier. Ce travail combine approches semi-analytique, expérimentale et numérique basée sur la méthode des Discrete Element Method (DEM).

2. Approche semi-analytique

L'objectif est d'essayer de comprendre d'un point de vue global les liens qu'il y a pour les vibrations basses fréquences entre les propriétés du réservoir (géométrie et matériaux), celle du fluide (densité) et celle du milieu granulaire (géométrie, matériau, organisation et précontrainte). L'étude a été réalisée en 2D en utilisant les résultats analytiques d'un anneau rempli de fluide [1], une approche

d'homogénéisation du milieu granulaire [2] et la méthode de Rayleigh-Ritz basée sur les déformées modales d'un anneau libre et d'une membrane libre [3].

3. Approche expérimentale

Pour aller plus loin dans la compréhension des phénomènes, il est nécessaire de passer à une phase expérimentale. Celle-ci comporte deux volets : la détermination des propriétés matériaux du milieu granulaire à notre disposition et la réalisation d'essais vibratoires. Les billes utilisées sont des billes creuses en polymère fournies par la société ATECA. La caractérisation réalisée grâce à des essais œdométriques cyclés a mis en évidence un comportement assimilable à de la viscoélasticité qui n'est pas encore prise en compte dans la modélisation. Concernant les essais vibratoires, le banc est en cours de développement. La figure (1) présente un schéma de principe et la CAO du banc en cours de réalisation.

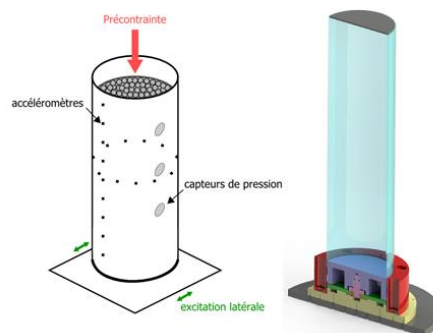


Figure 1 – schéma de principe et CAO du banc d'essai vibratoire

5. Approche numérique

Afin de pouvoir comprendre ce qui se passe à l'intérieur du milieu granulaire, une modélisation par éléments finis (EF) pour le réservoir et par DEM pour les billes[4] est en cours développement, en collaboration avec la société Dynas+.

5. Perspectives

Plusieurs points restent à développer. Du point de vue analytique, il faut travailler sur la prise en compte des effets visqueux à l'aide de modèles rhéologiques non-linéaires. Concernant les aspects expérimentaux, d'autres essais de caractérisations matériaux sont prévus ainsi que la mise en place et l'analyse des essais vibratoires. Enfin, d'un point de vue numérique, il faut affiner les méthodes des compactions avant de pouvoir réaliser les essais numériques (calcul explicites).

Références

- [1] J.-F. Sigrist, *Interaction fluide-structure : Analyse vibratoire par éléments finis*, Ellipse, 2011.
- [2] B. Andreotti, Y. Forterre, O. Pouliquen, *Les milieux granulaires—Entre fluide et solide*, EDP sciences, 2012.
- [3] C.-B. Kim, H. S. Cho, H. G. Beom. Exact solutions of in-plane natural vibration of a circular plate with outer edge restrained elastically, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 331, Num. 9, Pag.2173-2189, 2012.
- [4] P.A. Cundall, O.D. Strack, A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol. 29, Num. 1, Pag.47-65, 1979.

Etude par émission acoustique de l'endommagement des structures multi-matériaux à base de bois

Doctorant : Imen YAHYAOU¹

Encadrants : Xiaojing GONG², Marianne PERRIN³

¹ *imen.yahyaoui@iut-tarbes.fr*

² *xiaojing.gong@iut-tarbes.fr*, ³ *marianne.perrin@iut-tarbes.fr*

Résumé — Une des conséquences des préoccupations environnementales actuelles est une augmentation importante de l'utilisation du matériau bois dans la construction. Afin de multiplier la part du bois de structure, ce matériau naturel est souvent associé aux matériaux composites. Ceci permet de réaliser des structures légères et mécaniquement intéressantes. Afin d'assurer la fiabilité de ces structures hybrides, la connaissance de leurs mécanismes d'endommagement est un élément primordial. L'objectif de ce travail s'oriente donc vers le suivi par émission acoustique de l'endommagement des structures multi-matériaux à base de bois.

Abstract — The use of wood for constructional purposes has been recently raised due to increasing ecological awareness. Further, the association of wood with fiber reinforced polymer materials is particularly successful in terms of computability and complementarity of features. In order to increase the efficiency in the use of this hybrid structure as a construction material, a thorough comprehension of the failure evolution and the damage mechanisms is required. This study is dedicated to the monitoring of the damage of wood-based composite materials with Acoustic Emission method.

1. Introduction

Aujourd'hui suite aux problèmes environnementaux et aux problèmes de développement durable, le retour aux matériaux écologiques tels que le bois représente une solution intéressante pour valoriser les ressources naturelles. Le bois possède aussi des atouts qui le rendent intéressant pour une utilisation en structure tel que son rapport poids/résistance. Cependant, ce matériau est très sensible à l'humidité et est fortement anisotrope ce qui diminue sa fiabilité. Dans ce cadre, plusieurs chercheurs ont étudié la possibilité d'associer le bois avec d'autres matériaux afin d'améliorer ses propriétés. En effet, le renforcement du bois par matériaux composites (polymères renforcés par des fibres) est largement étudié (Lacroix 2000, Borri 2005, Nguyen 2010). Les résultats de ces travaux montrent une amélioration au niveau de la rigidité et de la résistance de la poutre renforcée. Donc, ces structures mixtes sont à la fois originales et mécaniquement très intéressantes. Chaque matériau ayant un rôle important dans la performance de la structure. Le remplacement des matériaux classiques (acier, béton) par ces structures hybrides est motivé par l'allègement de la structure à propriétés mécaniques égales. En revanche l'endommagement de ces structures mixtes n'est pas encore maîtrisé (Nguyen 2010). Dans ce but, il est essentiel de suivre le comportement de ces multi-matériaux collés sous sollicitations afin d'identifier les mécanismes d'endommagement mis en jeu, leur initiation et leur développement jusqu'à rupture. Afin de répondre à cette problématique, cette étude mettra en valeur les différents mécanismes d'endommagement de ces structures hybride à l'aide d'une technique de contrôle non destructif qui est l'émission acoustique.

2. Programme expérimental

Afin d'identifier les mécanismes d'endommagement des structures mixtes bois-composites une démarche expérimentale a été mise en place. Elle consiste dans un premier lieu à suivre par émission acoustique l'endommagement de chaque matériau isolé. La seconde étape consiste à suivre l'endommagement de ces structures collées (lamellé-collé renforcé). Le matériau principal étant le bois. Cette étude débute donc par le suivi de l'endommagement de ce matériau par émission acoustique. Pour ce faire trois essences ont été sélectionnées (douglas, sapin pectiné et peuplier). Etant donné que le bois utilisé dans les applications structurales telles que les ouvrages d'art ou la construction est soumis généralement à des sollicitations de flexion, on a adopté la démarche suivante : dans un premier lieu on a suivi par émission acoustique l'endommagement de cinq éprouvettes normalisées de chaque essence sollicitées en flexion 4-points. Ensuite, des essais de suivi de l'endommagement en traction et en compression sont programmés afin de mieux analyser les signaux enregistrés lors des essais de flexion. La mise en place des essais de flexion suivis par émission acoustique nécessite des études préliminaires afin de déterminer les capteurs adéquats. Il s'agit également d'identifier leurs positions optimales sur l'éprouvette, permettant ainsi de récupérer et de localiser le maximum de signaux acoustiques. Les signaux récupérés lors des essais de flexion font l'objet d'une classification statistique en utilisant un logiciel de reconnaissance de forme « Noesis ». Ceci permet d'identifier les différents types de mécanismes d'endommagement présents lors des essais.

3. Conclusions et perspectives

Les résultats obtenus lors des essais de flexion montrent une évolution acoustique similaire pour les trois essences. En effet le bois commence à générer des signaux à faibles charges. Ces signaux restent faibles lors du comportement élastique du matériau. Au-delà de la limite d'élasticité on enregistre un accroissement de l'activité acoustique jusqu'à la rupture. Néanmoins, l'intensité acoustique dépend de l'essence testée. En effet, le douglas est le bois le plus émissif parmi les trois essences choisies. Pour les autres essences, on a enregistré une rupture brusque et brutale à la fin de l'essai. En ce qui concerne la classification statistique des signaux, les résultats permettent de distinguer deux classes. Les étapes suivantes de ce travail de recherche consistent tout d'abord à réaliser les essais de traction et de compression suivi par émission acoustique. Ces essais permettent de mieux comprendre les signaux enregistrés lors des essais de flexion. En suite des essais arrêtés et des observations microscopiques vont être programmés afin d'identifier les mécanismes qui correspondent à chaque classe de signaux.

A terme, après une étude détaillée des mécanismes d'endommagement du matériau bois, des essais de suivi par émission acoustique de l'endommagement du bois collé et de structures mixtes à base de bois sont envisagés.

Références

- A. Borri. A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials, *Composites*, Num. 36, Pag.143-153, 2005.
- S. Lacroix. Etude du renforcement de poutres en bois scié avec des matériaux composites : Mémoire de maîtrise en sciences appliquées, Sherbrooke, Québec, Canada, 2000.
- V. Nguyen. Multi renforcement du bois lamellé-collé: étude théorique et expérimentale. Thèse d'ENPC. 2010

Utilisation de matériaux bois intelligents pour la gestion durable des infrastructures

Doctorant : Hang LI¹

Encadrants : Marianne PERRIN², Florent EYMA³, Xavier JACOB⁴, Vincent GIBIAT⁵

¹ hang.li@iut-tarbes.fr

² marianne.perrin@iut-tarbes.fr, ³ florent.eyma@iut-tarbes.fr, ⁴ xavier.jacob@univ-tlse3.fr, ⁵ vincent.gibat@univ-tlse3.fr

Résumé — Depuis quinze ans, on recommence à construire en bois (surtout en bois lamellé-collé (LC)) pour répondre aux nouveaux challenges imposés par le « développement durable ». Néanmoins, des problèmes de dégradations liés à l'humidité limitent leur développement. Le suivi de l'humidité devient donc indispensable. À l'issue de la recherche bibliographique, deux technologies se révèlent intéressantes : les mesures électriques et les mesures ultrasonores. Suite à cela, différentes configurations de mesure ont été identifiées et nos premiers résultats montrent que ces configurations sont efficaces pour mesurer les variations d'humidité dans le LC.

Abstract — For fifteen years, we restart to construct with wood (especially with glulam) to respond to the new challenges imposed by “sustainable development”. However, moisture-related degradation issues limit their development, the monitoring of moisture content (MC) becomes thus essential. According to the bibliographic research, two technologies turn out to be interesting: the electrical measurements and the ultrasonic measurements. In the light of this, different measurement configurations were identified and our first results show that these configurations are effective to measure changes in MC of glulam beams.

Introduction

Depuis le début du XXI^{ème} siècle, le matériau bois revient sur le devant de la scène dans le domaine du Génie-civil et plus particulièrement dans les ouvrages d'art en bois. Ceci s'explique en partie par les nouveaux challenges imposés par le « développement durable ». Néanmoins, les problèmes de durabilité des structures en bois sont un élément limitant leur développement. Des endommagements de structures liés à la fissuration, à la délamination, ainsi qu'aux attaques fongiques ou aux attaques d'insectes sont constatés sur les ouvrages d'art en bois. La principale condition d'apparition de ces pathologies est l'humidité excessive du matériau ou la variation de cette humidité (cycles humidité/séchage). Toutefois, il n'existe pas de méthodes de contrôle permettant un suivi en continu de l'humidité dans les ouvrages d'art en bois. De ce fait, afin de permettre un plus grand développement de ce type de construction, les gestionnaires d'ouvrages ont exprimé leur besoin en méthodes de suivi en continu de l'humidité du bois (Sétra 2006).

Par ailleurs, on voit aujourd'hui un fort développement des structures en bois lamellé-collé (LC) du fait de leur résistance mécanique élevée (par rapport au bois massif), mais aussi par la possibilité qu'elles offrent pour construire des ouvrages de grandes portées. Suite à ce constat, on se propose de transformer ces structures bois en matériaux « intelligents » par l'intégration de systèmes de suivi de l'humidité dans les poutres LC. L'objectif est d'alerter les gestionnaires au plus vite des risques potentiels d'endommagement de leurs ouvrages. Ce travail de recherche propose de développer des outils de diagnostics intégrés permettant un suivi en continu de l'état de santé structurale des ouvrages en bois et permettant aussi une évaluation de leur durée de vie résiduelle. L'objectif sous-jacent étant de proposer aux industriels une gamme de matériaux de très haute technologie et à bas coût pour la création d'ouvrages innovants.

Etude bibliographique

Notre recherche bibliographique a montré que de nombreuses techniques de contrôle peuvent être employées pour la mesure de l'humidité (Skaar 1998 ; Bucur 2003). Parmi elles, deux familles de méthodes non destructives peuvent répondre aux contraintes d'un suivi continu des ouvrages : les méthodes électriques (par résistivité ou par capacité) et les méthodes ultrasonores (par ultrasons (US) ou par acousto-ultrasons (AU)). Les méthodes électriques consistent à mesurer l'humidité par l'intermédiaire des variations de résistivité ou de capacité du matériau. Les méthodes ultrasonores consistent à corrélérer l'humidité à la vitesse ultrasonore (US) ou à la forme du signal (AU).

Programme expérimental

Pour les mesures électriques, on a identifié 4 configurations de mesure en utilisant des électrodes de forme « pointe » ou de forme « film » pour effectuer des mesures résistives et/ou capacitives. Une étude de faisabilité a été mise en place afin de s'assurer du bon fonctionnement des différentes configurations face au processus de fabrication du bois LC (pression de collage de 10 bar). Le protocole de mesure d'humidité a également été validé (protocole d'instrumentation, protocole de collage, réglages de dispositifs...). Suite à ça, une campagne d'essais complète a été lancée en utilisant le protocole validé lors des premiers tests pour contrôler la variation d'humidité dans les échantillons LC.

En parallèle, la partie « mesures ultrasonores » a été démarrée par une présélection de 11 capteurs piézoélectriques flexibles et de faible épaisseur. Ces 11 capteurs acoustiques se trouvent dans trois grandes familles: PVDF (Polyvinylidene fluoride), AFC (Active Fiber Composite) et MFC (Macro-fiber Composite) (Safari and Akdogan 2008). Les PVDF sont des films piézoélectriques de nature polymère alors que les AFC et les MFC sont des composites à fibres piézoélectriques. Par la suite, nous dupliquerons le programme expérimental utilisé pour les mesures électriques.

Conclusions et perspectives

Les premiers résultats sur la partie « mesures électriques » montrent que les configurations choisies sont opérationnelles pour mesurer les variations d'humidité du bois LC. En ce qui concerne la partie « mesures ultrasonores », les premiers tests sur le fonctionnement et le comportement des capteurs décèlent leur potentiel de mise en place pour le suivi de l'humidité dans le bois LC.

Les prochaines étapes consistent à vérifier que les configurations testées sont efficaces et que la résistance mécanique des joints collés n'est pas altérée par la présence des capteurs. Par la suite, les meilleures configurations seront utilisées pour les essais de « durabilité » qui ont pour but d'étudier l'influence des cycles humidité/séchage sur l'endommagement et la durabilité des poutres LC en mettant en évidence des coefficients d'abattelements en fonction de l'exposition à l'humidité.

Références

- [1] Bucur V. *Nondestructive characterization and imaging of wood*, Springer Series in Wood Science, 2003
- [2] Safari A.(Ed.), Akdogan E.K.(Ed.) *Piezoelectric and acoustic materials for transducer applications*, Springer, 2008
- [3] SETRA, *Les ponts en bois : Comment assurer leur durabilité*, Guide technique du SETRA (Service d'études technique des routes et autoroutes), 2006
- [4] Skaar C. *Wood-water relations*, Springer Series in Wood Science, 1998

Failure mode maps des Inserts dans les structures sandwichs

Doctorant : Juan de Dios RODRIGUEZ RAMIREZ¹

Encadrants : Bruno CASTANIE², Christophe BOUVET³

¹ jddrodri@etude.insa-toulouse.fr

² castanie@insa-toulouse.fr, ³ christophe.bouvet@isae.fr

Résumé — Le calcul des inserts dans les structures sandwichs est de fait encore largement empirique et conduit à de larges surdimensionnements. Les méthodes sont basées essentiellement sur des formules de type RDM, des approches analytiques discutables. Dans ce travail un modèle EF est développé pour améliorer la description de l'endommagement, puis, une analyse du flambement des cellules du nida est montrée. Le but est d'intégrer ces caractéristiques dans le modèle EF global pour après définir des cartes de rupture des inserts très précis.

Abstract — the calculation of inserts in sandwiches structures is still made with widely empirical equations leading to a wide oversizing. The methods are essentially based on formulas type RDM and debatable analytical approaches. In this work a FE model is developed to improve the description of the damage, then, an analysis of the buckling of the cells of the Honeycomb is shown. The purpose is to integrate these characteristics into the global FE model to define later cards of break of the very precise inserts.

1. Introduction

Les panneaux sandwich ont une rigidité en flexion importante permettent de concevoir des structures aéronautiques légères. Cependant un de leurs inconvénients est la limitation de jonction car les panneaux sandwich ne sont pas très résistants aux charges locales. Pour éviter ce problème une densification de l'âme est faite montant les propriétés mécaniques d'une zone spécifique, voici ce qui est un insert. Toutefois, le calcul des inserts dans les structures sandwichs est de fait encore largement empirique ce qui conduit à de larges surdimensionnements. Par ailleurs, il a été montré que lorsqu'une force d'arrachement est appliquée à l'insert, le nid d'abeille est la première partie de la structure qui se dégrade, [1], [2], [3], [4]. Pour modeler le comportement d'insert il est absolument nécessaire de caractériser le comportement du nid d'abeille sous contraintes de cisaillement.

2. L'analyse du comportement du Nomex

Les propriétés mécaniques du nid d'abeille de Nomex sont différentes dans les directions **l** et **t**, donc la caractérisation dans les deux directions est nécessaire. Ces caractéristiques peuvent être obtenues en utilisant un spécimen de poutre sandwich dans un test de 3 points. Selon la théorie de sandwichs classique toute force de cisaillement sera absorbé par l'âme tandis que les forces de flexion sont absorbées par les peaux. Cependant, nous cherchons étudier aussi le flambement des cellules, donc de tests différents sont proposés.

2.1 Résultats des Tests

Plusieurs tests ont été faits, tous les spécimens testés sont montrés dans la figure 1. Une explication plus détaillée est fournie de ceux qui se sont avérés utiles. Un test trois points a été fait nous permettant d'obtenir la courbe montrée dans la figure 2, aucune autre donnée utile n'a pas pu être extraite. Un spécimen double rail a été testé pour obtenir la courbe a montré dans la figure 2 une analyse du flambement des cellules a été fait, le démarrage de cette phénomène arrive quand au moins

deux cellules flambent dans deux emplacements différents, l'analyse montre que la contrainte moyenne équivalente de cisaillement est 0.22689 Mpa. À priori les résultats semblent cohérents avec ceux du fournisseur. Plusieurs autres test ont été fait mais les résultats ne sont pas estimés utiles.

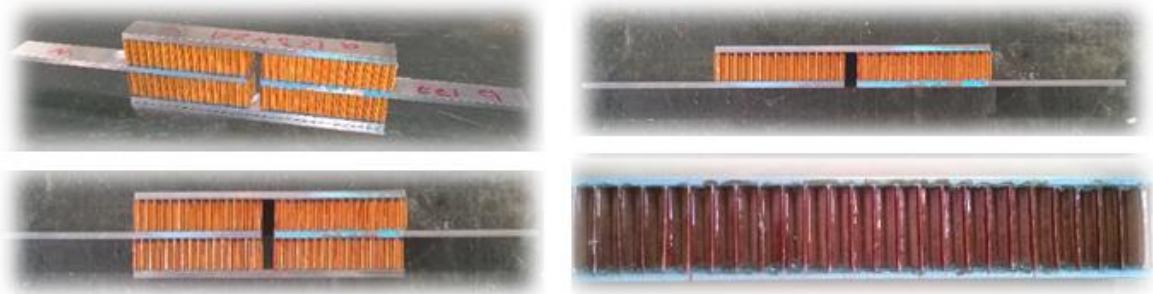


Figure 1 – Les types d'éprouvettes qui ont été testés.

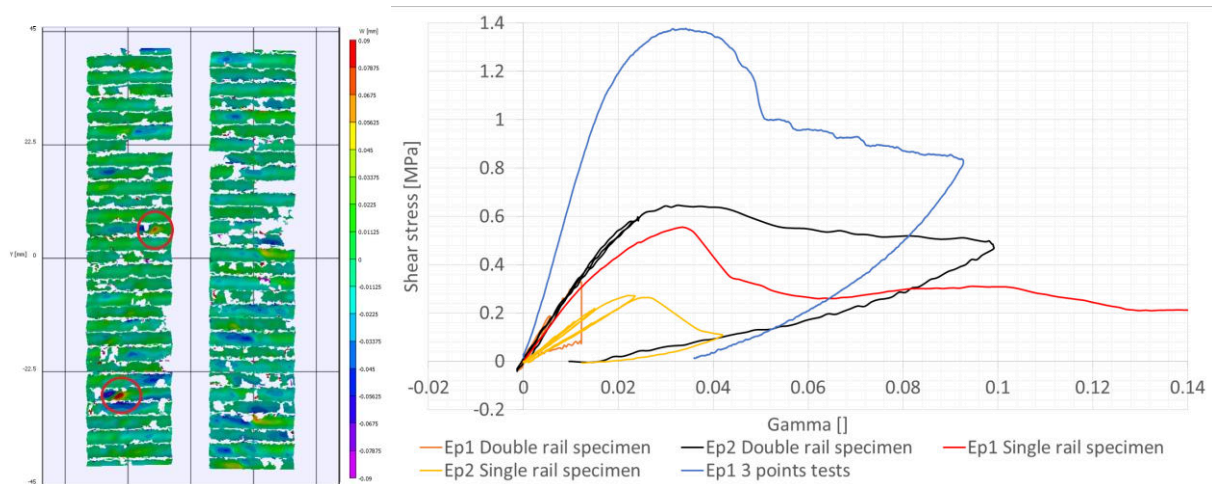


Figure 2 – Les résultats de l'analyse du nida, le flambement des cellules et les résultats des tests pour le nida

3. Perspectives et travaux à faire

Pour l'analyse du nida il reste à fabriquer le reste des éprouvettes et analyser les résultats. Pour le potting il reste à finaliser le design des éprouvettes, les fabriquer et réaliser les essais. En suite une modélisation de la rupture du potting va être faite. Pour le modèle EF il faudra intégrer ces critères et ensuite s'en servir pour définir des cartes de mode de rupture des inserts.

Références

- [1] Esa, "Insert design handbook," no. March, p. 488, 2011.
- [2] P. Bunyawichakul, B. Castanié, and J.-J. Barrau, "Non-linear finite element analysis of inserts in composite sandwich structures," *Compos. Part B Eng.*, vol. 39, no. 7–8, pp. 1077–1092, Oct. 2008.
- [3] S. Heimbs and M. Pein, "Failure behaviour of honeycomb sandwich corner joints and inserts," *Compos. Struct.*, vol. 89, no. 4, pp. 575–588, 2009.
- [4] R. Roy, K. H. Nguyen, Y. B. Park, J. H. Kweon, and J. H. Choi, "Testing and modeling of Nomex TM honeycomb sandwich Panels with bolt insert," *Compos. Part B Eng.*, vol. 56, pp. 762–769, 2013.

Propagation de délaminage sous spectre de charge vibratoire

Doctorant : Guillaume ANDROUIN¹

Encadrants : Xiaojing GONG², Laurent MICHEL³, Irène MAILLET⁴

¹ guillaume.androuin@isae.fr

² xiaojing.gong@iut-tarbes.fr, ³ laurent.michel@isae.fr, ⁴ irene.maillet@intradef.gouv.fr

Résumé — L'étude de la propagation de délaminage est menée sur un composite carbone/époxyde. Les effets de la fréquence et du rapport de charge sont mis en évidence pour des essais de propagation de délaminage en mode I et II pur. Les résultats sont exploités en termes de Lois de Paris, présentant l'évolution de la vitesse de propagation de délaminage en fonction du taux de restitution d'énergie appliqué. Un des objectifs finaux est la mise en place d'un essai de fatigue à haute fréquence en mode mixte I/II, permettant l'étude de la propagation de délaminage pour des spectres de charges réels appliqués aux composantes volantes en composite stratifié.

Abstract — Delamination propagation under cyclic loading is studied on a carbon/epoxy composite material. Load frequency and load ratio effects are demonstrated by the results from the tests in pure mode I and in pure mode II. And then the fatigue behaviour for each pure mode has been described by Paris's law in term of Fatigue Crack Growth Rate (FCGR) as a function of Strain Energy Release Rate (SERR). One final goal of this work is to develop a fatigue testing device for mixed mode I/II high frequency vibration loading, so as to study the behaviour of delamination propagation in laminate structures under real in-flight load spectra.

1. Introduction et contexte

L'emploi massif des matériaux composites, pour leurs hautes performances mécaniques alliées à une faible masse, les soumet à différents environnements et donc types de chargement. Cependant, que ce soit pendant la fabrication ou pendant son utilisation, la structure stratifiée des matériaux composites conduit souvent à la formation de délaminage, dont la propagation est une des causes majeures de rupture du matériau. Les travaux de recherche menés pour la thèse « Propagation de délaminage sous spectre de charge vibratoire » visent à comprendre les mécanismes qui mènent à la propagation de ce type de défauts.

L'étude de la propagation de délaminage sous chargement vibratoire s'inscrit dans le contexte de la tolérance aux dommages des structures en composites stratifiés. La possibilité de prévoir l'évolution d'un délaminage au sein d'une structure doit permettre de connaître sa tenue mécanique et donc sa durée de vie en service. Actuellement la philosophie de la certification en tolérance aux dommages pour les structures composites aéronautiques consiste à s'assurer de la non propagation du défaut. Ces structures sont soumises à des spectres de chargement complexe qui font que pour une structure présentant un défaut le chargement de fatigue comprendra plusieurs rapports de mode, rapports de charge, amplitudes et fréquences de sollicitations différentes. L'étude de la propagation et des seuils de propagation de délaminage pour ces spectres commence donc par l'analyse en mode pur, I et II, qui sont les modes de propagation élémentaires avant de traiter le mode mixte I/II. La compréhension des effets de changement de rapport de charge et de fréquence sous ces modes purs est la première étape d'analyse de la propagation. La deuxième partie portera sur l'étude de la propagation et des seuils de propagation en mode mixte I/II.

2. Travaux expérimentaux réalisés

Les résultats expérimentaux de la propagation de délaminage sont exploités pour établir la loi de Paris (Eq. 1) ou sa forme modifiée. Les essais sont menés sur le matériau T700/M21 pour le mode I et les matériaux composites carbone/époxyde G947 (UD), G939 (Tissu équilibré) et NC66 (UD) pour le mode II, afin de consolider les résultats obtenus dans les travaux de thèse d'I. Maillet [3].

$$\frac{da}{dN} = k(G_{max})^n \quad (1)$$

Les effets du rapport de charge sur les courbes de propagation en mode I et II ont été mis en évidence. L'augmentation du rapport de charge a pour conséquence de réduire la vitesse de propagation du délaminage, pour un même taux de restitution d'énergie maximum.

En ce qui concerne les effets de la fréquence, seul le mode II a été exploré. Les essais menés sur le matériau à R=-1 à DGA-TA à haute fréquence selon la procédure d'I. Maillet et les essais menés à 10Hz pour un rapport de charge R=0.1 à l'ICA, ont permis de tracer des courbes de propagation pour le matériau G947. Les courbes ont la même pente mais présentent un décalage : le faible rapport de charge conduit à des vitesses de propagation plus faibles comme énoncé plus haut. Ce phénomène a pu être intégré dans la loi de Paris par la définition de ΔG , proposée par Rans [1], au lieu de G_{max} . Ainsi, une courbe maîtresse de propagation de délaminage peut être établie, qui est indépendante du rapport de charge et de la fréquence de chargement. La procédure d'essai n'a pas permis d'étudier la propagation de délaminage en mode II pur pour le matériau G939, qui rompait au niveau de l'encastrement avant la propagation du défaut. Concernant le matériau NC66, les courbes de propagation à haute et basse fréquence présentent la même pente mais la définition de Rans ne permet pas de construire une courbe maîtresse.

Suite à ces travaux sur le rapport de charge et la fréquence, des essais sur le cumul d'endommagement en mode I pur ont été menés et l'interprétation des résultats est en cours. Les réflexions sont sur l'effet de l'historique de chargement qui mènera à l'étude de la propagation de délaminage sous un spectre de charge.

3. Perspectives

L'effet de la fréquence sur la propagation de délaminage en mode I reste à conforter. I. Maillet a mis en place un montage d'essai de fatigue vibratoire permettant une fréquence de sollicitation de 100Hz [2] et a montré l'unicité des courbes de propagation à 10Hz et 100Hz. Le but des prochains essais est d'élargir le nombre de fréquences étudiées afin de consolider ce résultat. Ensuite, des essais sur le cumul d'endommagement permettront de mettre en évidence des règles de cumul afin de traiter les spectres de charges. Enfin, un des objectifs majeurs de la thèse est la mise en place d'un essai de fatigue vibratoire en mode mixte I/II. L'étude de l'effet de fréquence sur la propagation en mode mixte sera menée. Le cumul de dommage sera également abordé via des spectres de charges définis, en mettant à profit les résultats de propagation en mode pur.

4. Références bibliographiques

- [1] C. Rans, R. Alderliesten et R. Benedictus, «Misinterpreting the results : How similitude can improve our understanding of fatigue delamination growth,» *Composites Science and Technology*, vol. 71, pp. 230-238, 2011.
- [2] I. Maillet, L. Michel, G. Rico, M. Fressinet et Y. Gourinat, «A new test methodology based on structural resonance for mode I fatigue delamination growth in an unidirectional composite,» *Composite Structures*, vol. 97, pp. 353-362, 2013.
- [3] I. Maillet, L. Michel, F. Souric et Y. Gourinat, «Mode II fatigue delamination growth characterization of a carbon/epoxy laminate at high frequency under vibration loading,» *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 149, pp. 298-312, 2015.

Optimisation numérique et expérimentale de la tolérance aux dommages d'impact d'un stratifié composite aéronautique

Doctorant : Nicolas DUBARY¹

Encadrants : Christophe BOUVET², Samuel RIVALLANT³, Léon RATSIFANDRIHANA⁴

¹ nicolas.dubary@isae.fr

² christophe.bouvet@isae.fr, ³ samuel.rivallant@isae.fr, ⁴ leon.ratsifandrihana@segula.fr

Résumé — Les matériaux composites connaissent un intérêt croissant et leur utilisation est grandissante. Cependant, ils sont vulnérables aux sollicitations hors-plan telles que l'impact et les structures sont donc surdimensionnées. Ces travaux de thèses portent sur l'étude expérimentale et numérique de la tolérance aux dommages d'impact d'un stratifié composite aéronautique. Des concepts sont testés expérimentalement et le modèle développé à l'ICA est utilisé pour proposer une démarche de dimensionnement de stratifié. Des améliorations de modélisation sont également proposées.

Abstract — More and more importance is given to composite structures, known to be vulnerable to out-of-plane solicitations. Impact damage tolerance of composite laminates is numerically and experimentally investigated. The model developed at ICA is used to propose a numerical designing approach, and modeling improvements are implemented. Concepts are experimentally tested to suit with impact damage tolerance philosophy. A “test-calculation dialogue” is also followed for basic laminate composites.

1. Introduction et contexte

Ces travaux de thèse portent sur la tolérance aux dommages d'impact des matériaux composites, de plus en plus utilisés dans les structures pour leur ratio performance/masse élevé. Ils sont cependant surdimensionnés à cause de leur vulnérabilité aux sollicitations hors-plan [1]. Un impact faible vitesse/énergie peut réduire drastiquement les propriétés résiduelles de la plaque sans pour autant laisser de trace visible en surface. Cette marque est l'indentation permanente.

Basée sur la tolérance aux dommages d'impact et sur la visibilité externe de l'endommagement, les exigences des autorités de certifications associent les charges requises en tenue par la structure à un seuil de détectabilité de l'indentation permanente appelé BVID [2]. La tenue résiduelle et la détectabilité de l'endommagement sont donc deux points clés pour le dimensionnement. Le travail effectué est axé suivant deux approches incluant les essais d'impacts et de compression après impact (CAI) : une approche numérique et une approche expérimentale.

2. Travaux Numériques

Les travaux proposés sont dans la continuité des travaux de thèse menés par N. Hongkarnjanakul [3]. Le modèle (Discrete Ply Model) développé à l'ICA par Bouvet et al. au cours des 10 dernières années permet de rendre compte des endommagements principaux d'impact (ruptures de fibres, fissuration matricielle et délaminage) et un comportement en CAI plutôt fidèle à l'expérimental. L'indentation permanente étant également capturée, ce modèle permet alors d'entreprendre des travaux d'optimisation de stratifiés composites en s'appuyant sur la philosophie du dimensionnement en tolérance aux dommages d'impact. A partir d'une géométrie, d'un drapage de référence $[0_2/45_2/90_2/-45_2]_s$ et de règles de drapages classiques, un impact à énergie donnée et la CAI sont donc numériquement menés sur différentes séquences d'empilement. Le but de l'étude est d'obtenir un drapage permettant une bonne visibilité de l'endommagement avec la meilleure tenue résiduelle possible. La lecture de ces résultats est disponible figure 1.

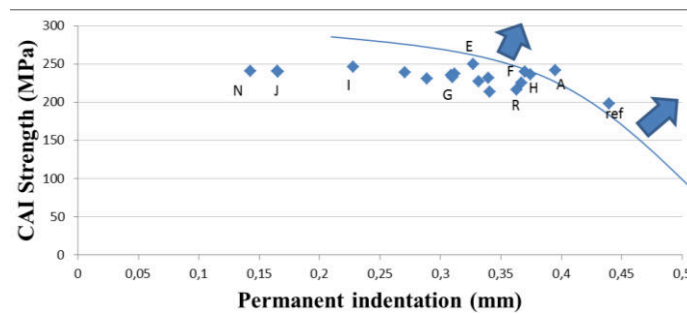


Figure 13 – Campagne numérique d’impact à énergie donnée et de CAI sur plusieurs drapages : tenue résiduelle en CAI en fonction de l’indentation permanente pour les différentes séquences d’empilement.

A côté de ces travaux, une modification du maillage initial est proposée dans le but d’intégrer une loi de comportement adaptée aux plis tissés (non possible avec la géométrie des éléments utilisés actuellement pour la modélisation des plis à $\pm 45^\circ$). Il s’agira ensuite de valider le modèle sur un stratifié de plis tissés puis d’ouvrir sur un mélange de plis unidirectionnels et plis tissés.

3. Travaux Expérimentaux

Expérimentalement, des essais d’impact à différentes énergies et de compression après impact sur des concepts mis en place au sein du laboratoire ICA sont effectués. De la fabrication au post-traitement des résultats de CAI et la mesure de l’indentation permanente, ces essais représentent le comportement des stratifiés en tolérance aux dommages d’impact et jugent de leurs performances. Pour exemple une caractérisation expérimentale est effectuée sur des stratifiés hybrides UD carbone/tissés verre (fig.2) :



Figure 2 – Résultats expérimentaux sur stratifiés hybrides. De gauche à droite : courbes d’impact, C-Scan et courbes de CAI.

Les indentations permanentes ne sont pas fournies ici. En plus de permettre une comparaison avec un stratifié UD de référence et d’obtenir de plus amples informations sur le comportement en tolérance aux dommages, ces essais permettront également de valider le comportement du modèle par un dialogue « essai-calcul ». D’autres concepts sont mis en place et testés pour tenter de répondre à la problématique industrielle. Un projet en collaboration avec l’Insa-Rouen est également mené sur des composites thermo-estampés à matrice thermoplastique.

Références

- [1] S. Abrate. *Impact on composites Structures*, Cambridge University Press, 1998.
- [2] A. Tropis, M. Thomas, J.L. Bounie, P. Lafon. Certification of the composite outer wing of the ATR72, *Journal of Aerospace Engineering, Proceedings of the Institution of mechanical Engineers Part G*, 209:327-339, 1994.
- [3] N. Hongkarnjanakul. Modélisation numérique pour la tolérance aux dommages d’impact sur stratifié composite : de l’impact à la résistance résiduelle en compression, *Thèse de l’Université de Toulouse*, 2013.

Développement d'un essai Arcan dynamique

Doctorant : Benjamin VALES¹

Encadrants : Steven MARGUET², Jean-François FERRERO³, Pablo NAVARRO⁴

¹ benjamin.vales@univ-tlse3.fr

² steven.marguet@univ-tlse3.fr, ³ Jean-francois.ferrero@univ-tlse3.fr, ⁴ pablo.navarro@univ-tlse3.fr

Résumé — La caractérisation des adhésifs des assemblages collés sous chargements combinés dynamiques est aujourd'hui cruciale pour le développement des futures structures dédiées au secteur du transport. Dans ce cadre, l'essai Arcan modifié permet d'étudier ces joints sous chargements combinés quasi-statiques tout en minimisant les « effets de bords » qui se produisent dans l'adhésif. La question de son extensibilité sous chargements dynamiques via l'utilisation d'une tour de chute est investiguée dans la thèse. Les premiers résultats sont positifs et montrent la pertinence du sujet d'étude mais établissent également les limites de l'essai.

Abstract — The characterization of the adhesive of bonded assemblies under combined and dynamic loading cases appears to be crucial for the development of the future structures dedicated to the transport sector. In that context, the modified Arcan test allows the study of these joints under quasi-static combined loading while minimizing the edge effects occurring in the adhesive. The question of its extensibility to dynamic loadings by the use of an impactor guided into a drop tower is investigated in the thesis. First results are positive and show the appropriateness of the topic but also establish the limits of the test.

1. Introduction générale

Les assemblages collés sont de plus en plus utilisés dans l'industrie du transport en vue d'améliorer la conception et la fiabilité des structures des véhicules dits « légers ». Néanmoins, la compréhension du comportement mécanique de ces assemblages sous chargements combinés dynamiques doit être un prérequis afin d'assurer la sécurité des utilisateurs. Les travaux de thèse présentés ici portent sur le développement d'un moyen de caractérisation adapté à ces types de sollicitations.

2. Présentation de l'éprouvette Arcan TCS

À ce jour, la plupart des essais sur les joints de colle sont dédiés à des études comparatives et seulement quelques-uns à des fins de caractérisation. Parmi ces derniers, l'essai Arcan modifié développé pour des essais quasi-statiques par Créac'hcadec *et al.* [1] sur la base des travaux d'Arcan, Cognard *et al.* [2, 3] semble prometteur. L'éprouvette utilisée pour celui-ci est présentée sur la Figure 1. Elle est composée de deux substrats métalliques entre lesquels est disposé l'adhésif d'intérêt. Chaque substrat (au nombre de 2) comporte 4 alésages permettant de tester le joint en traction, traction-cisaillement, cisaillement ou compression-cisaillement (en utilisant respectivement les alésages notés 0°, 45°, 90° ou 135°). Afin de réduire les concentrations de contraintes au niveau des bords libres de la zone de recouvrement, plus communément appelées « effets de bords », deux stratégies sont utilisées : (1) l'utilisation d'un faible ratio $\beta = E_s/E_a$, correspondant au ratio entre les modules

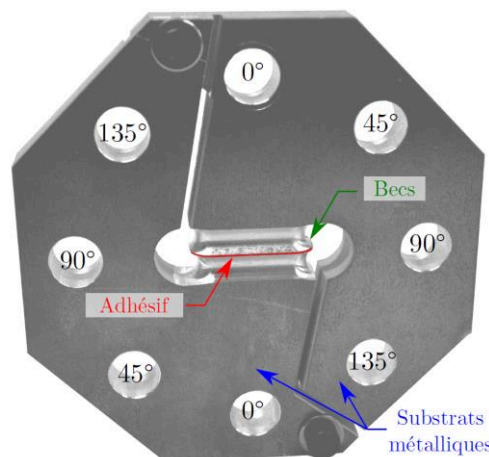


Figure 14 - Éprouvette Arcan TCS

d'Young des substrats et de l'adhésif et (2) l'utilisation de becs rayonnés [4]. L'extension de l'utilisation de cette éprouvette sous sollicitations dynamiques constitue le point de départ de la thèse.

3. Campagne expérimentale

Une étude expérimentale du montage Arcan TCS a été réalisée sous tour de chute. Les premiers résultats amènent deux observations majeures : (1) La vitesse de déformation a une influence marquée sur le comportement mécanique de l'adhésif étudié. En comparaison avec des résultats issus d'essais quasi-statiques (avec des vitesses de déformation de l'ordre de 10^{-3} s^{-1}), les contraintes à rupture obtenues en dynamique peuvent dépasser les 130% d'augmentation (pour des vitesses de déformation de l'ordre de 1000 s^{-1}). Cette première observation met en évidence la pertinence de la mise au point d'un moyen de caractérisation des adhésifs sous chargements dynamiques. (2) Les conditions d'essais et notamment la masse de l'impacteur jouent un rôle important sur la qualité de mise en mouvement du montage. Ainsi, les essais ont mis en évidence que pour une hauteur donnée, augmenter la masse de l'impacteur permet de stabiliser le comportement vibratoire de l'éprouvette via une meilleure transmission du mouvement de l'impacteur au montage.

4. Études éléments finis

Deux études éléments finis ont été réalisées : (1) La première à l'échelle « locale », porte sur l'influence des paramètres géométriques et matériaux associés à l'éprouvette sur la répartition des contraintes dans l'adhésif. Celle-ci a permis de valider en dynamique les stratégies permettant de limiter les effets de bords adoptées en quasi-statique (*i.e.* les becs et le faible gradient de raideur entre les substrats et l'adhésif). (2) La deuxième à l'échelle « éprouvette », étudie l'influence des paramètres d'essai sur la qualité de la répartition spatiale et temporelle des contraintes dans l'adhésif. Les résultats issus de cette dernière corroborent la deuxième observation expérimentale *i.e.* l'utilisation d'un impacteur dont la masse est élevée semble être un moyen pertinent permettant d'assurer un chargement stable et homogène de l'adhésif durant l'essai.

5. Perspectives

Ces deux études ont permis le développement d'une nouvelle éprouvette ainsi que d'un nouveau montage d'essais adaptés à la caractérisation des adhésifs d'assemblages collés sous chargements combinés dynamiques. Il vient alors en perspectives : (1) la validation du nouveau montage ainsi que de la nouvelle éprouvette et (2) la caractérisation de différents adhésifs communément utilisés dans le domaine du transport à des fins de validation.

Références

- [1] R. Créac'hcadec, L. Sohier, C. Cellard, B. Gineste. A stress concentration-free bonded arcan tensile compression shear test specimen for the evaluation of adhesive mechanical response, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol.61, Pag.81-92, 2015.
- [2] L. Arcan, M. Arcan, L. Daniel. Sem fractography of pure and mixed mode interlaminar fracture in graphite/epoxy composites, *ASTM Technical Publication*, Vol.948, Pag.41-67, 1987.
- [3] J. Cognard, P. Davies, B. Gineste, L. Sohier. Development of an improved adhesive test method for composite assembly design, *Composite Science and Technology*, Vol.65, Pag.359-368, 2005.
- [4] B. Valès, S. Marguet, R. Créac'hcadec, L. Sohier, J.-F. Ferrero, P. Navarro. Numerical study of the local behaviour of adhesive bonds under dynamic loading, *Journal of adhesion science and technology*, Vol.30, Pag.1319-1339, 2016.

Comment s'y rendre ?



Plan du campus ISAE-SUPAERO

10 avenue Édouard Belin - Toulouse

