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

4ème édition

Les 15 et 16 mai 2019

En l'amphi 4 de l'ISAE-SUPAERO

avec diffusion en streaming en direct

(liens dans le programme)

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 4ème 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. Nous espérons que ces journées seront une incitation renouvelée, notamment chez nos jeunes doctorants, à tenir à jour leur page web sur le site internet du laboratoire afin de contribuer à la visibilité de leur projet scientifique. Plus globalement, il s'agit aussi de contribuer à la visibilité de celui du laboratoire vis à vis des communautés, nationales et internationales, scientifiques et industrielles.

Pour le comité d'animation scientifique de l'ICA

Francis Collombet et Christian Gogu

Table des matières

Programme 4

Anh Tuan Le. Elaboration et caractérisation de composites nano-structurés hybrides pour l'amélioration de la tenue à l'impact 8

Thiago Vasconcellos Birro. Prédiction de la Rupture des Assemblages Collés Composite / Métal 10

Benoit Montagne. Effet de l'interaction fixation composite sur les modes de rupture des assemblages boulonnés composites 12

Ldjoudi Manseri. Étude expérimentale et numérique du comportement des composites stratifiés hybrides tissus/unidirectionnels sous chargement d'impact 14

Aissatou Ndong. Étude des transformations physico-chimiques et du comportement thermo-mécanique de mélanges argile/CSR lors de la cuisson et relations avec la microstructure 16

Vivien Nouri. Formulation de dispersions aqueuses d'imprégnation pour l'élaboration de matériaux thermoplastiques à base de fibres de carbone 18

Jennifer Mackie. Modélisation de la phase de fusion/imprégnation dans le procédé de fabrication de tape composite thermoplastique 20

Florian Boutenel. Elaboration de composites à matrice céramique par des procédés voie liquide 22

Marie Doumeng. Étude tribologique des nanocomposites à matrice thermoplastique PAEK : projet COMUE-Région TRIPEEK 24

Placide Uwizeyimana. Suivi de la sante structurale des infrastructures en bois par intégration de capteurs 26

Phuong Linh Luong. Mesure de champs cinématiques à chaud pour la mise en forme d'alliages de titane 28

Francesco De Giorgi. Amélioration des performances des actionneurs électrique embarqué à travers une optimisation de la contrainte thermique 30

Martin Delavenne. Optimisation Numérique de la performance d'un avion par winglet actif 32

Guillaume Colantonio. Identification de paramètres de comportement à partir de mesure de champs cinématique 34

Adama Diourté. Optimisation de la fabrication additive de pièces métalliques par soudage à l'arc 36

Morgane Menz. Vers une synergie entre analyses de fiabilité par échantillonnage adaptatif et réduction de modèles 38

Tohme Tohme. Migration de particules de forme complexe dans des micro-canaux 40

Geneviève Mkadara. Développement de modèles des systèmes de commande vol des hélicoptères pour le diagnostic de faute et la surveillance 42

Alexandra Lacombe. Étude de l'état de contrainte en bord de trou dans les structures aéronautiques suite au procédé de perçage 44

Stella Ancey-Rocchi. Influence des conditions de mise en solution sur le compromis résistance mécanique-ténacité de l'acier maraging inoxydable MLX19 pour application train d'atterrissage 46

Laurie Despax. Étude des mécanismes de plasticité à haute température d'alliages de titane : approche métallurgique de la formabilité 48

Morgane Geyer. Étude des relations entre paramètres de soudage et usure des outillages du procédé FSW sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'une soudure Aluminium-Titane 50

Tarek Younsi. Influence sur le comportement mécanique de rechargements obtenus par procédé de fabrication additive SLM 52

Konstantinos Nikolakopoulos. *Modélisation numérique des structures haute résistance soumises à des sollicitations sévères* 54

Anthea Comellini. Rendez-vous basé vision avec un satellite non collaboratif pour la capture de débris en orbite 56

Mercredi 15 mai - matin		
Thématiques : Matériaux et Structures Composites **Streaming : https://prismes.univ-toulouse.fr/player.php?code=S7a04692&width=100%&height=100%**		
Jury : Francis Collombet (président), Christophe Bouvet, Bruno Castanié, Thierry Cutard, Quentin Govignon, Joseph Morlier, Philippe Olivier, Jean-Noël Périé, Samuel Rivallant, Fabrice Schmidt		
Horaires	Doctorant. Sujet de thèse.	Equipe d'encadrement
9 : 00 - 9 : 20	Anh Tuan Le. Elaboration et caractérisation de composites nano-structurés hybrides pour l'amélioration de la tenue à l'impact (CONFIDENTIEL – PAS DE STREAMING)	Thierry Cutard, Samuel Rivallant, Quentin Govignon
9 : 20 - 9 : 40	Thiago Vasconcellos Birro. Prédiction de la Rupture des Assemblages Collés Composite / Métal	Frédéric Lachaud, Eric Paroissien, Maëlenn Aufray (CIRIMAT)
9 : 40 - 10 : 00	Benoit Montagne. Effet de l'interaction fixation composite sur les modes de rupture des assemblages boulonnés composites	Frédéric Lachaud, Eric Paroissien
10 : 00 - 10 : 20	Ldjoudi Manseri. Étude expérimentale et numérique du comportement des composites stratifiés hybrides tissus/unidirectionnels sous chargement d'impact	Jean-Francois Ferrero, Pablo Navarro, Olivier Dorival
10 : 20 - 10 : 40	Pause café	
10 : 40 - 11 : 00	Aissatou Ndong. Étude des transformations physico-chimiques et du comportement thermo-mécanique de mélanges argile/CSR lors de la cuisson et relations avec la microstructure (CONFIDENTIEL – PAS DE STREAMING)	Thierry Cutard, Nzihou Ange (Rapsodee), Pham Minh Doan (Rapsodee)
11 : 00 - 11 : 20	Vivien Nouri. Formulation de dispersions aqueuses d'imprégnation pour l'élaboration de matériaux thermoplastiques à base de fibres de carbone (CONFIDENTIEL – PAS DE STREAMING)	Olivier De Almeida, Emile PEREZ (IMRCP)
11 : 20 - 11 : 40	Jennifer Mackie. Modélisation de la phase de fusion/imprégnation dans le procédé de fabrication de tape composite thermoplastique	Olivier De Almeida, Fabrice Schmidt
11 : 40 - 12 : 00	Florian Boutenel. Elaboration de composites à matrice céramique par des procédés voie liquide	Thierry Cutard, Gilles Dusserre
12 : 00 - 12 : 20	Délibération du jury	

Mercredi 15 mai – après-midi		
Thématique : Métrologie, Identification, Contrôle et Surveillance & Matériaux et Structures Composites* **Streaming : https://prismes.univ-toulouse.fr/player.php?code=y1421VwE&width=100%&height=100%**		
Jury : Francis Collombet (president), Florentin Berthet, Olivier De Almeida, Florent Eyma, Quentin Govignon, Yannick Le Maoult		
Horaires	Doctorant. Sujet de thèse.	Equipe d'encadrement
14 : 00 - 14 : 20	Marie Doumeng. Étude tribologique des nanocomposites à matrice thermoplastique PAEK : projet COMUE-Région TRIPEEK*	Florentin Berthet, Jean Denape, Karl Delbé
14 : 20 - 14 : 40	Placide Uwizeyimana. Suivi de la sante structurale des infrastructures en bois par intégration de capteurs	Marianne Perrin, Florent Eyma
14 : 40 - 15 : 00	Phuong Linh Luong. Mesure de champs cinématiques à chaud pour la mise en forme d'alliages de titane	Luc Penazzi, Rebecca Bonnaire
15 : 00 - 15 : 20	Délibération du jury	
15 : 20 - 15 : 40		
15 : 40 - 16 : 00		
16 : 00 - 16 : 20		

Jeudi 16 mai – matin		
Thématique : Modélisation des Systèmes et Microsystèmes **Streaming : https://prismes.univ-toulouse.fr/player.php?code=m46Pvd1D&width=100%&height=100%**		
Jury : Christian Gogu (président), Lucien Baldas, Jean Michel Baleynaud, Marc Budinger, Florian Bugarin, Stéphane Colin, Ion Hazyuk, Edouard Marenic, Michel Salaun		
Horaires	Doctorant. Sujet de thèse.	Equipe d'encadrement
9 : 00 - 9 : 20	Francesco De Giorgi. Amélioration des performances des actionneurs électrique embarqué à travers une optimisation de la contrainte thermique	Marc Budinger, Ion Hazyuk, Jean-Charles Maré
9 : 20 - 9 : 40	Martin Delavenne. Optimisation Numérique de la performance d'un avion par winglet actif	Michel Salaün, V. Ferrand (ISAE/DAEP)
9 : 40 - 10 : 00	Guillaume Colantonio. Identification de paramètres de comportement à partir de mesure de champs cinématique	Jean-Charles Passieux, Eduard Marenic
10 : 00 - 10 : 20	Adama Diourté. Optimisation de la fabrication additive de pièces métalliques par soudage à l'arc	Stéphane Segonds, Florian Bugarin, C. Bordreuil (LMGC)
10 : 20 - 10 : 40	Pause café	
10 : 40 - 11 : 00	Morgane Menz. Vers une synergie entre analyses de fiabilité par échantillonnage adaptatif et réduction de modèles	Christian Gogu, N. Bartoli (Onera), J. Morio (Onera)
11 : 00 - 11 : 20	Tohme Tohme. Migration de particules de forme complexe dans des micro-canaux	Lucien Baldas, Pascale Magaud
11 : 20 - 11 : 40	Geneviève Mkadara. Développement de modèles des systèmes de commande vol des hélicoptères pour le diagnostic de faute et la surveillance	Jean-Charles Maré
11 : 40 - 12 : 00	Délibération du jury	

Jeudi 16 mai - après-midi		
Thématique : Surfaces, Usinages, Matériaux et Outillages **Streaming : https://prismes.univ-toulouse.fr/player.php?code=byyrHF0F&width=100%&height=100%**		
Jury : Christian Gogu (président), Denis Delagnes, Patrick Gilles, Yann Landon, Luc Penazzi, Adriana Soveja, Vanessa Vidal		
Horaires	Doctorant. Sujet de thèse.	Equipe d'encadrement
14 : 00 - 14 : 20	Alexandra Lacombe. Étude de l'état de contrainte en bord de trou dans les structures aéronautiques suite au procédé de perçage	Yann Landon, Manuel Paredes
14 : 20 - 14 : 40	Stella Ancey-Rocchi. Influence des conditions de mise en solution sur le compromis résistance mécanique-ténacité de l'acier maraging inoxydable MLX19 pour application train d'atterrissage	Denis Delagnes, Vanessa Vidal
14 : 40 - 15 : 00	Laurie Despax. Étude des mécanismes de plasticité à haute température d'alliages de titane : approche métallurgique de la formabilité	Denis Delagnes, Vanessa Vidal, M. Dehmas (CIRIMAT)
15 : 00 - 15 : 20	Pause café	
15 : 20 - 15 : 40	Morgane Geyer. Étude des relations entre paramètres de soudage et usure des outillages du procédé FSW sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'une soudure Aluminium-Titane	Christine Boher, Vanessa Vidal, Farhad Rézaï-Aria
15 : 40 - 16 : 00	Tarek Younsi. Influence sur le comportement mécanique de rechargements obtenus par procédé de fabrication additive SLM	Christine Boher, Adriana Soveja
16 : 00 – 16 : 20	Délibération du jury - Clôture des journées	

Élaboration et caractérisation de composites hybrides nano-structurés pour l'amélioration de la tenue à l'impact

Doctorant : Anh Tuan LE[1]
Encadrants : Thierry CUTARD[2], Samuel RIVALLANT[3], Quentin GOVIGNON[4]

[1] anh_tuan.le@mines-albi.fr,
[2] thierry.cutard@mines-albi.fr , [3] samuel.rivallant@isae-supaero.fr, [4] quentin.govignon@mines-albi.fr.

Résumé — L'incorporation de nanoconstituants dans le volume d'un solide est un champ d'innovation dans le domaine des nanotechnologies. Une partie de la thèse consiste à introduire un tapis de nanotubes de carbone alignés verticalement (VACNTs) entre les plis d'un composite stratifié. Afin de vérifier la faisabilité de la fabrication du composite hybride nano-structuré, nous proposons un procédé de mise en œuvre qui permet d'avoir une efficacité élevée du transfert des VACNTs sur un préimprégné et une maîtrise de l'imprégnation de la résine dans la forêt des nanotubes, tout en gardant la structure ordonnée initiale de cette dernière.

Abstract — Incorporation of nanoconstituents into a solid volume is one innovation field in nanotechnology. One part of the thesis consists of introducing a carpet of vertically aligned carbon nanotubes (VACNTs) between the plies of a composite laminate. In order to verify the feasibility of hybrid nano-structured composite manufacturing, we suggest a processing route allowing to have an efficient transfer of VACNTs onto a prepreg and to control the resin impregnation level while keeping initial ordered structure of the VACNTs carpets.

1. Introduction

Dans la littérature, Garcia *et al.* [1] ont montré une amélioration de la résistance à l'ouverture de fissure d'un nouveau composite nano-renforcé élaboré à partir d'empilements préimprégnés renforcés de VACNTs aux inter-plis. Veedu *et al.* [2] ont expérimentalement mis en évidence des augmentations de 240% de la résistance en flexion, et de 348% du G_{Ic} de composites présentant une croissance de nanotubes de carbone directement sur des fibres SiC. De nouveaux matériaux composites nano-renforcés peuvent donc posséder des propriétés mécaniques très élevées.

La thèse se déroule dans le cadre du projet collaboratif ATIHS[1], une partie du travail s'intéresse au procédé de mise en œuvre de ces nouveaux matériaux hybrides. Le prépreg utilisé est de type M55J/M18, les VACNTs d'une hauteur de 30µm ont crû sur un substrat Al et la densité des tapis de VACNTs est de l'ordre de 10^{11} VACNTs/cm². La taille nanométrique des VACNTs et leur forte densité surfacique sont des difficultés majeures pour l'imprégnation homogène de la résine polymérique du prépreg dans la forêt des VACNTs.

2. Élaboration des matériaux composites hybrides nano-structurés

Afin d'imprégner la résine dans les tapis des VACNTs, notre procédé de mise en œuvre exploite la montée capillaire de la résine entre les nanotubes. À cette étape, nous nous intéressons à la maîtrise de l'imprégnation de la résine dans les VACNTs en vue d'augmenter l'adhérence entre un tapis de VACNTs et un préimprégné, puis de faciliter la séparation du substrat Al du tapis de nanotubes. Pour

[1] Les auteurs remercient les partenaires du projet FUI ATIHS pour les échanges fructueux qui ont eu lieu en lien avec ces travaux, ainsi que BPI France et la région Occitanie pour le financement du projet.

obtenir une montée capillaire optimale, la détermination des intervalles des paramètres d'imprégnation appropriés (pression exercée à la surface du prépreg, température de chauffe, durée du palier isotherme) est nécessaire. Une illustration du procédé d'imprégnation est présentée à la figure 1.

La deuxième étape, la séparation, consiste à séparer la feuille Al du tapis de VACNTs. L'efficacité du transfert du tapis de VACNTs sur le préimprégné est un critère principal à étudier dans cette étape.

La section d'un échantillon composite hybride est obtenue en le découpant par un couteau chirurgical trempé dans l'azote liquide. Cette section est observée en microscopie électronique à balayage (MEB) afin d'analyser la morphologie de la forêt des VACNTs après le transfert, de déterminer la hauteur de montée capillaire de la résine dans la forêt des nanotubes et de visualiser la répartition d'éventuelles fissures au sein des tapis de nanotubes.

3. Résultats

Des résultats de transfert et une observation MEB d'une montée capillaire partielle de résine dans un tapis de VACNTs sont présentés dans la figure ci-dessous. En mesurant les hauteurs de montée capillaire en fonction des conditions d'imprégnation, il sera possible de modéliser ce processus en identifiant les paramètres du modèle de Lucas-Washburn.

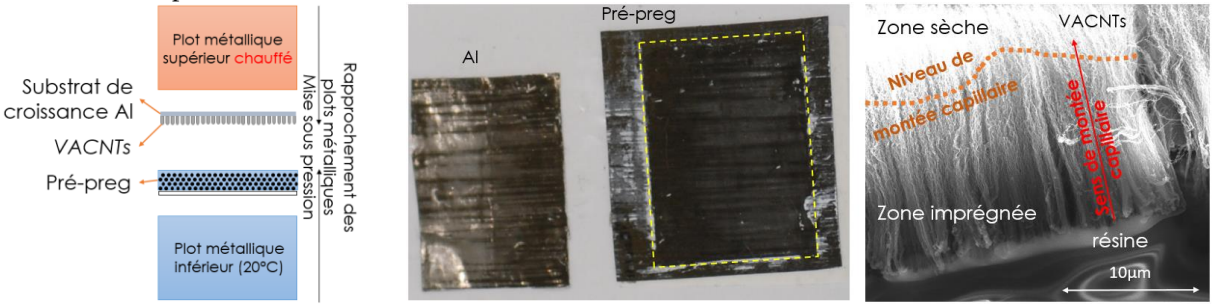

Figure 1 – Gauche : schéma du procédé d'imprégnation des VACNTs. Centre : VACNTs transférés du substrat Al sur le prépreg, les zones avec VACNTs apparaissent en noir. Droite : image MEB montrant une montée capillaire partielle de résine dans un tapis de VACNTs.

4. Conclusion et perspectives

Le taux de transfert élevé VACNTs – prépreg et la morphologie structurée des VACNTs après le transfert montrent que la fabrication du matériau composite hybride nano-structuré est réalisable. Une autre voie de fabrication consistera en l'imprégnation de renforts secs avec croissance de VACNTs.

Les caractérisations mécaniques des composites de référence (sans nanotubes) et des composites nano-renforcés seront ensuite effectuées suivant deux types d'essais : statiques et dynamique. Il s'agira en statique d'essais d'ouverture de fissure en modes I et II, d'essais de traction dans le plan et hors plan et d'essais de flexion. La réponse à l'impact des nouveaux matériaux pourra également être étudiée par des essais d'impact à vitesse balistique (~200m/s) et à basse vitesse (<10m/s). Ces caractérisations permettront de comparer les propriétés mécaniques des matériaux et ainsi de valider la capacité d'amélioration des performances de composites par introduction de nanotubes de carbone.

Références

1. Garcia, E. J., Wardle, B. L. & John Hart, A. Joining prepreg composite interfaces with aligned carbon nanotubes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* **39**, 1065–1070 (2008).
2. Veedu, V. P. *et al.* Multifunctional composites using reinforced laminae with carbon-nanotube forests. *Nature Materials* **5**, 457–462 (2006).

Prédiction de la Rupture d'Assemblages Collés Composites Métalliques

Doctorant : Thiago VASCONCELLOS BIRRO[1]
Encadrants : Fréderic LACHAUD[2], Maëlenn AUFRAY[3], Éric PAROISSIEN[4]

[1] *thiago.vasconcellos-birro@isae-supaero.fr*
[2] *frederic.lachaud2@isae.fr*, [3]*maelenn.aufray@ensiacet.fr*, [4]*eric.paroissien@isae-supaero.fr*

Résumé — Ces dernières années, une approche couplée énergétique et de contrainte a été utilisée avec succès pour traiter des problèmes de concentration de contrainte, car les critères en contraintes seuls ne sont plus valables près d'une singularité. Pour la caractérisation de la rupture adhésive, Roche et al. [1] ont développé un essai de flexion 3 points qui présente une condition de concentration similaire. Le critère couplé peut donc être appliqué pour prédire la défaillance à l'interface. Pour la détermination des propriétés mécaniques, l'approche semi-analytique des macro-élément et comparée aux obtenus avec la modélisation de la zone cohésive (CZM).

Abstract — In the recent years, a coupled energy and stress approach has been used successfully to treat problems involving stress concentration since the stress-based criteria only are no more valid near a singularity. For the adhesive failure characterization, Roche et al. [1] have developed a 3-point bending test which has a similar stress concentration condition, and thus the coupled criterion can be applied to predict the failure of the adhesively bonded joint. For mechanical properties determination, the semi-analytical approach Macro-element technique is used, and the results will be compared with Cohesive Zone Model (CZM).

1. Introduction

Le comportement instable et la compréhension parfaite de la fracture adhésive est un élément crucial pour dépasser le manque de confiance chez les industriels afin d'utiliser les joints collés sur les structures critiques. Bien que exploité, Roche *et al.* [1] ont développé un essai flexion 3 points spécifique qui fournit une surface mesurable pendant la phase d'initiation de la rupture adhésive, la force et le déplacement critiques, tous liés à la performance du système adhésif/substrat. Cependant, la force et le déplacement critiques obtenus dans cet essai sont dépendants directement de la géométrie du substrat. Sauvage *et al.* [2] ont proposé une première méthode basée sur l'énergie. En revanche, la grande problématique de Sauvage consiste à ne pas prendre en compte une approche basée sur la mécanique de la fracture, vu que la région d'initiation de rupture n'a pas été utilisée dans le modèle.

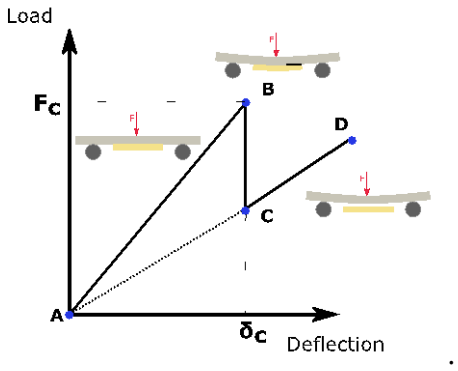

Figure 1 – Les étapes de la flexion 3 points

2. Méthodologie

Dans ces travaux de thèse, deux approches fiables, basées sur la mécanique de la rupture finie et de l'endommagement, sont utilisées pour traiter la concentration de contraintes et l'initiation de la fissure, en quantifiant l'adhérence : le critère couplé [3] et la modélisation de la zone cohésive. En utilisant les résultats expérimentaux, la contrainte et l'énergie sont calculées en utilisant une approche semi-analytique rapide basée sur les marco-éléments (ME) [4] et par la méthode des éléments finis, en déterminant alors la contrainte critique et la ténacité pour l'initiation de la rupture adhésive.

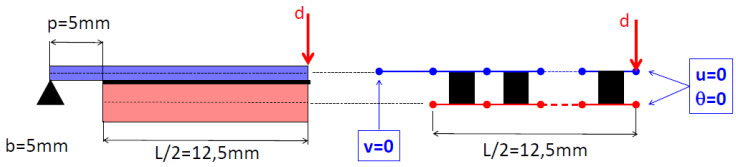

Figure 2 – Modélisation du système substrat, interphase et polymère par un modèle macro-élément.

3. Premiers résultats et perspectives

Avec les résultats expérimentaux et numériques, l'idée consiste à établir dans quelles conditions une initiation/propagation adhésive va prévaloir au détriment d'une cohésive au sein du joint collé.

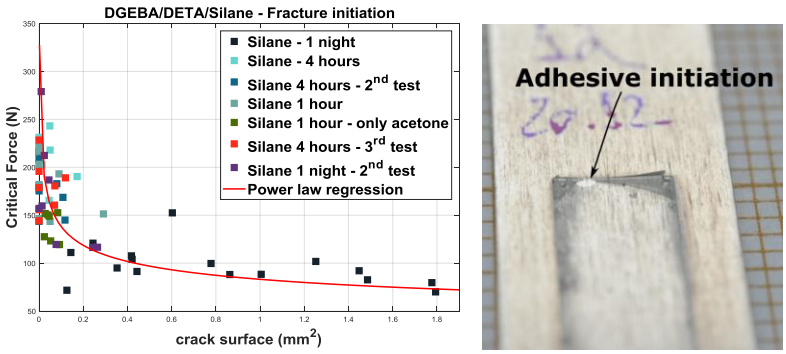

Figure 3 – (a) Étude expérimentale du rapport force critique et la taille de l'initiation adhésive (b) zone d'initiation adhésive sur l'éprouvette

Références bibliographiques

[1] A.A. Roche, A.K. Behme, and J.S. Solomon. A three-point flexure test configuration for improved sensitivity to metal/ adhesive interfacial phenomena. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 2, Num. 4, Pag. 249 – 254, 1982.

[2] J-B. Sauvage, M. Aufray, J-P. Jeandrau, P. Chalandon, D. Poquillon, M. Nardin. Using the 3-point bending method to study failure initiation in epoxide-aluminum joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 75, Num. 1, Pag. 181 – 189, 2017.

[3] D. Leguillon. Strength or toughness? A criterion for crack onset at a notch. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Vol. 21, Num. 1, Pag. 61-72, 2002.

[4] E. Paroissien, F. Lachaud, S. Schwartz, A. Da Veiga, P. Barrière. . *Simplified stress analysis of hybrid (bolted/bonded) joints.* International Journal of Adhesion and Adhesives,Vol- 30, Num. 3, Pag. 183-197, 2017

Effet de l'interaction fixation/composite sur les modes de rupture des assemblages boulonnés composites

Doctorant : Benoit MONTAGNE[1]
Encadrants : Frédéric LACHAUD[2], Eric PAROISSIEN[3], Fabrice CONGOURDEAU [4], Dominique MARTINI[5]

[1] *benoit.montagne@isae.fr*
[2] *frederic.lachaud@isae.fr*, [3] *eric.paroissien@isae.fr*, [4] *fabrice.congourdeau@dassault-aviation.com*, [5] *dominique.martini@dassault-aviation.com* .

Résumé — La problématique que nous abordons dans ces travaux de thèse est l'influence de l'interaction entre les fixations et le composite sur la tenue des assemblages boulonnés composites. Le passage des efforts d'assemblages dans le composite par les boulons engendre des dégradations locales conduisant à des modes de rupture variés du composite en fonction des principaux paramètres de conception. L'objectif de cette thèse est d'identifier la complexité de modélisation nécessaire pour traduire l'effet de ces paramètres de conception sur l'apparition des différents modes de rupture des matériaux composites et leur conséquence sur le dimensionnement des assemblages boulonnés.

Abstract — The problematic studied in this thesis is the influence of the interaction between fixations and composite on the bolted joint behavior. Stresses are crossing the joint thanks to the bolt. This creates local degradations and results in various failing modes depending on conception parameters. The goal of this thesis is to identify the needed complexity to explain the effect of these conception parameters on the various composite failing modes apparition and their consequences on bolted joints dimensioning.

Les matériaux composites à base de fibre de carbone et matrice organique (CFRP) sont considérés comme un moyen d'améliorer les performances des aéronefs futurs. Cependant, la compréhension fine de ces matériaux et la simulation robuste de leur comportement à rupture sont nécessaires pour optimiser les structures en matériaux composites afin d'obtenir les améliorations escomptées. Pour cela, DASSAULT AVIATION et l'Institut Clément Ader mènent un projet de recherche conjoint sur le comportement des assemblages boulonnés de matériaux composites. L'objectif de ce projet de recherche est :

- d'améliorer la compréhension des modes de ruines [1] des assemblages boulonnés en matériaux composites en fonction des paramètres de conception (pince, drapage …),

- de simuler de façon robuste le comportement à rupture grâce aux outils de modélisation avancée du comportement endommageable des matériaux composites développés à l'ICA

- de valider ces simulations vis-à-vis des effets des paramètres de conception sur le comportement à rupture.

Ces travaux se sont dans un premier temps focalisés sur l'analyse d'une importante base de données d'essais d'assemblages boulonnés en matériaux composites, fournie par DASSAULT AVIATION. Les limites des modélisations standards (comportement linéaire du composite) à traduire le comportement à rupture de ce type d'assemblage boulonné ont été constatées. Nous nous sommes alors intéressés à l'apport des modélisations avancées telles que développées à l'ICA [2] [3] pour simuler le comportement à rupture des assemblages composites.

Nous nous intéressons aux essais de double cisaillement et de simple cisaillement. L'essai de double cisaillement est modélisé en 2D avec des éléments de contrainte plane comme illustré en Fig. 1. L'essai de simple cisaillement est simulé en 2,5D avec des éléments de plaque comme illustré en Fig. 1. Un modèle d'endommagement est utilisé pour le matériau composite. Ce modèle ne considère que les endommagements fibre et matriciel dans les plis. Du fait des représentations 2D et 2,5D, le délaminage entre plis ne peut être simulé. Enfin, les simulations sont réalisées à l'aide du logiciel SAMCEF® où le comportement endommageable est intégré par une loi utilisateur.

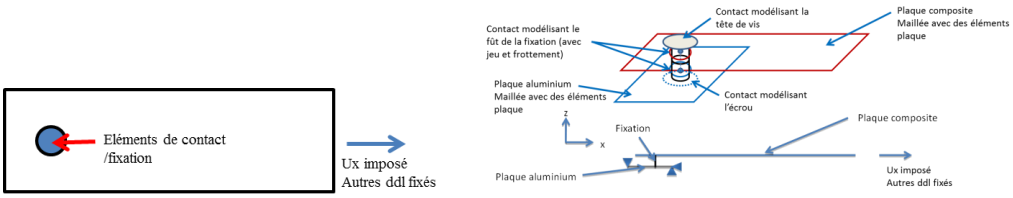

Figure 1 - Schéma de principe des modèles EF 2D et 2,5D

Ces simulations ont permis d'identifier un scénario d'endommagement du composite au cours du chargement de l'assemblage. Ce scénario est très similaire quel que soit le type d'assemblage, en double ou simple cisaillement. Dans un premier temps, nous observons l'apparition d'endommagement matriciel sans influence sur la courbe global effort/déplacement de l'assemblage. Puis les fibres dans les différentes orientations s'endommagent en compression ce qui se traduit par une perte de raideur de l'assemblage. Ces endommagements se propagent ensuite sur une zone restreinte du composite, entrainant une raideur faible de l'assemblage par rapport à sa raideur initiale. Enfin, nous constatons un endommagement des fibres en traction qui conduit à des difficultés importantes de convergence. Ces résultats sont illustrés sur la Fig. 3

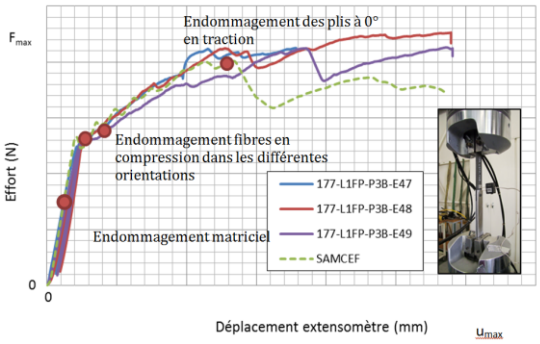

Figure 3 – Courbes expérimentales et numérique pour les essais de double cisaillement

Pour la suite de ces travaux, nous souhaitons valider à partir d'essais interrompus le scénario hypothétique d'endommagement obtenu. Il nous paraît aussi nécessaire d'étudier plus précisément les différentes méthodes de régularisation qui permettraient d'améliorer la convergence de ces simulations et d'en améliorer la robustesse.

Références bibliographiques

[1] Hart-Smith, « Mechanically-fastened joints for advanced composites », *Fibrous Compos. Struct. Des.*, p. 543‑574, 1980.

[2] A. Matzenmiller, J. Lubliner, et R. Taylor, « A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites », *Mech. Mater.*, nº 20, p. 125‑152, 1995.

[3] M. Ilyas, « Modélisation de l'endommagement de composites stratifiés carbone époxy sous impact », Université Toulouse, Toulouse, 2010.

Etude expérimentale et numérique du comportement d'un stratifié composite hybride (tissu/UD) sous chargement d'impact.

Doctorant : Ldjoudi MANSERI[1]
Encadrants : Jean-François FERRERO[2], Pablo NAVARRO[3], Olivier DORIVAL[4]

[1] ldjoudi.manseri@univ-tlse3.fr
[2] jean-françois.ferrero@univ-tlse3.fr , [3] pablo.navarro@univ-tlse3.fr, [4] olivier.dorival@icam.fr

Résumé — Les structures composites peuvent être soumises à divers impacts durant leur cycle de vie. Les plus pénalisants sont les impacts basse vitesse, pouvant être dus par exemple à des chutes d'outillages durant les manutentions. Ces impacts provoquent fissurations transverses hors-plan conduisant à des délaminages, indétectables à l'œil nu, particulièrement pour les stratifiés épais. L'objectif de la thèse est donc de comprendre puis de modéliser numériquement l'apparition de ces fissurations transverses. Pour cela, on s'appuiera sur la stratégie semi-continue, développée par [1, 2 & 3].

Abstract — Composites structures can undergo several impacts during their life cycle. The most penalizing are low velocity impacts, which can be due to tooling fall during handling. Those impacts cause out-of-plane transverse cracks that lead to delamination, undetectable with naked eye, particularly for thick laminates. The aim of the PhD is to understand and to modelize numerically the formation of those transverse cracks. To this end, the semi-continuous strategy, developed by [1, 2 &3] is used.

1. Observations expérimentales

Lors d'un impact basse vitesse sur une structure composite, plusieurs types de dommages peuvent apparaître, comme la rupture de fibres, ou encore de la fissuration matricielle. Les fissurations matricielles, orientées à 45°, sont dues au cisaillement hors-plan. Ces dernières vont amorcer des délaminages entre les plis. L'un des critères actuels pour le dimensionnement à l'impact est le BVID (Barely Visible Impact Damage) : dès qu'un dommage est visible sur la structure, on considère que cette dernière est endommagée. Cependant ce critère est trop conservatif et pas assez quantitatif. L'objectif est donc de comprendre l'apparition de ces délaminages, qui sont la cause principale de l'endommagement d'une structure composite, puis de les modéliser numériquement pour un dimensionnement plus précis.

2. Développements numériques

2.1. Interface intralaminaire

Le modèle initial est celui de [1, 2 & 3] basé sur la stratégie semi-continue. Le but est de développer un nouvel élément d'interface (interface intralaminaire), qui s'intercale entre les éléments plaque déjà existants (cf. Figure 1).

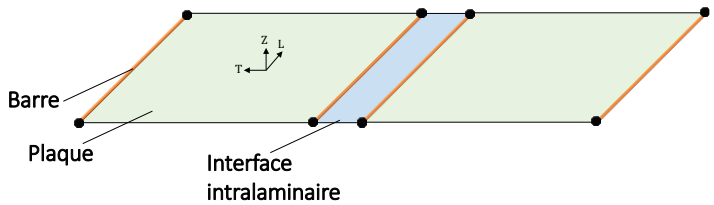

Figure 1 – Positionnement de l'interface verticale

Cet élément plaque de 10 µm de largeur est piloté en sauts de déplacements. A partir de ces sauts de déplacements, sont calculées les contraintes dans cette interface intralaminaire. Elles sont une somme des contributions des sauts de déplacements et de sauts de rotations. Ces contraintes (cf. Equation 1) sont dégradées avec une unique variable d'endommagement d_{intV}.

$$\vec{\sigma} = \overrightarrow{\sigma^{\delta}} + \overrightarrow{\sigma^{\delta\theta}}$$
$$\begin{pmatrix}\sigma_{TT}\\ \sigma_{LT}\\ \sigma_{ZT}\end{pmatrix} = (1 - d_{intV})\left[\begin{pmatrix}K_{TT}.\delta_T\\ K_{LT}.\delta_L\\ K_{ZT}.\delta_Z\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}K^r_{TT}.\delta\theta_L\\ K^r_{LT}.\delta\theta_T\\ 0\end{pmatrix}\right] \quad \textbf{(1)}$$

En ce qui concerne l'endommagement de cette interface, on utilise une loi exponentielle. Pour l'initiation on utilise un critère quadratique en contraintes puis une loi puissance pour la rupture.

2.2. Elément UD (barres + plaque)

En parallèle de cette interface, le modèle UD est enrichi. En effet, pour mieux reprendre la flexion du stratifié, les éléments barres ont été offsetés (c'est-à-dire qu'ils ne sont plus dans le plan de la plaque).

3. Conclusions et perspectives

Un élément d'interface intralaminaire a été développé pour représenter numériquement les fissurations transverses dues au cisaillement hors-plan. Cet élément a été validé en statique sur des essais de traction et de flexion à 0° et à 90°. Ce modèle reste encore à valider sur des essais d'indentation quasi-statique sur des stratifications épaisses avec des plis d'UD. Des essais d'impact sont aussi nécessaires pour valider le modèle en dynamique sur une gamme de vitesses allant de 3 à 5 m/s. Finalement, une fois cet élément validé sur l'UD, on effectuera des essais d'indentation quasi-statique et d'impact sur des stratifications hybrides : tissu + UD, et comprendre ainsi les mécanismes qui régissent ce type de structure.

Références

[1] F. Pascal, O. Dorival, P. Navarro, S. Marguet, J.-F. Ferrero. Impact damage prediction in thin woven composite laminates – Part I : Modelling strategy and validation, *Composites Structures*, 190, 2018

[2] B. Mahmoud, M. Colungo Torrecilla, P. Navarro, S. Marguet, I. Tawk, J.-F. Ferrero. Semi-continuous strategy for the modeling of damage mechanisms in unidirectionnal composites under low velocity impacts, *Composites*, Part B. 2017

[3] F. Pascal, P. Navarro, S. Marguet, J.-F. Ferrero. On the modelling of low to medium velocity impact onto woven composite materials with a 2D semi-continuous approach, *Composites Structures*, 134, 302-310, 2015.

Étude des transformations physico-chimiques et du comportement thermomécanique de mélanges argileux lors de la cuisson et relations avec la microstructure et le développement du flux vitreux

Aïssatou NDONG[1]
Encadrants : Thierry CUTARD[2], Ange NZIHOU[3], Doan PHAM MINH[4]

[1] *aissatou.ndong@mines-albi..fr: laboratoires ICA (UMR CNRS 5312) et RAPSODEE (UMR CNRS 5302)*
[2] *thierry.cutard@mines-albi.fr : laboratoire ICA (UMR CNRS 5312)*
[3] *ange.nzihou@mines-albi.fr,* [4] *doan.phamminh@mines-albi.fr : laboratoire RAPSODEE (UMR CNRS 5302)*

Résumé — Les incorporations de résidus agricoles et coproduits dans les matrices de terre cuite ont permis une amélioration de leurs propriétés finales. Elles ont aussi permis de détecter des phénomènes à l'échelle microscopique à haute température. Cette collaboration entre TERREAL et les laboratoires ICA et RAPSODEE, vise à mieux comprendre les phénomènes liés au développement du flux vitreux lors de la cuisson de ces matériaux, ses effets sur l'évolution de la microstructure et les propriétés finales. L'ajout d'agents fusibles susceptibles d'être des accélérateurs du développement du flux vitreux fera aussi l'objet de la deuxième partie de ces travaux, ainsi qu'une étude cinétique du frittage.

Abstract — The incorporation of agricultural residues and co-product into terracotta matrixes have led to significant improvements in their final properties. The previous studies allowed analyzing the micro-scale mechanism that occurs at high temperatures. The current collaboration between TERREAL and laboratories ICA and RAPSODEE, aims to have a deeper understanding of these phenomena. Hence, the work will focus on the understanding of the development of the liquid glassy phase during firing and its effect on the microstructure and the final properties. Later, by adding different fluxing agents, the firing temperature could be lowered by accelerating the liquid glassy phase formation. A study of sintering kinetics is planed too.

1. Objectif et résultats

La première étape de ces travaux de recherche est basée sur la compréhension des comportements lors d'un premier cycle thermique de trois mélanges argileux industriels. Deux mélanges sont considérés comme des matières premières : les mélanges A et B qui sont connus par notre partenaire industriel comme ayant des compositions chimiques et minéralogiques assez simples mais bien distinctes. Le troisième mélange, nommé C, est composé de 80% mass. du mélange A et 20% mass. du mélange B. Par la suite, le mélange C fera l'objet d'étude plus approfondies au cours de ce projet. Des cycles thermiques allant de 30°C à 1120°C ont été considérés, avec des vitesses de montée et descente en température de 5°C/min et 3°C/min respectivement.

Les résultats de la figure 1 mettent en évidence que :

- les trois mélanges argileux présentent les mêmes tendances pour leurs comportements thermiques et thermomécaniques,
- chaque mélange est caractérisé par ses propres plages de température pour les transformations physico-chimiques,
- le comportement du mélange Ludowici ne respecte pas toujours une loi des mélanges :
    - une loi des mélanges est respectée pour le comportement à basse température (T < 800°C), qui résulte de mécanismes de décomposition tels que la déshydratation, la déshydroxylation, etc. [1]

- non-respect d'une loi des mélanges pour le comportement à haute température (T > 800°C).

- la création de phases visqueuses et de flux vitreux [1] : mise en évidence par des méthodes indirectes (TMA, suivi du module de Young et de l'amortissement par résonance acoustique) et au MEB.

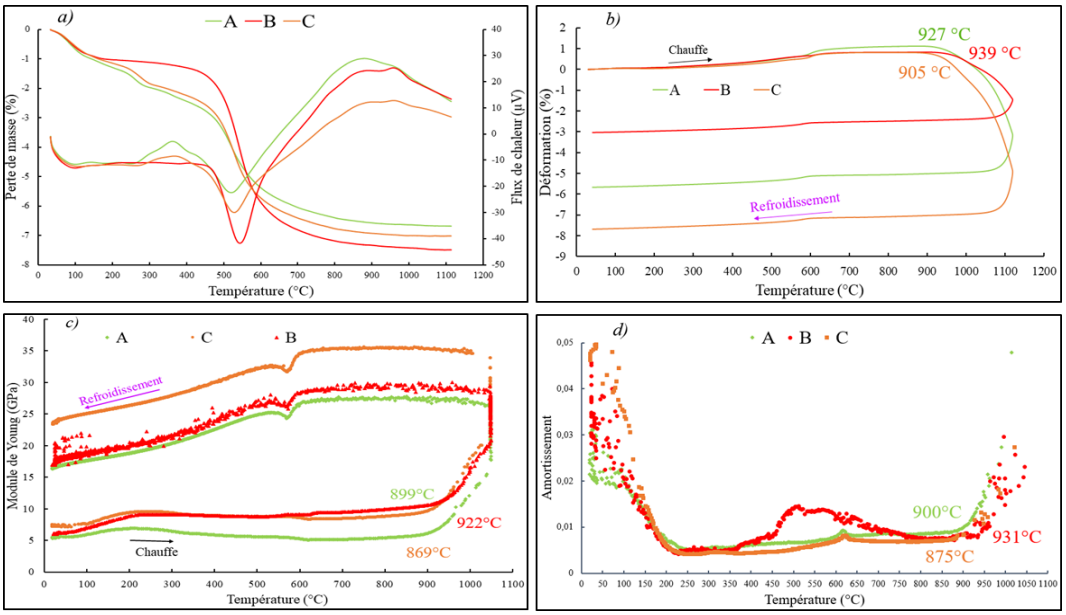

Figure 1 – Résultats d'analyses thermiques et thermomécaniques des trois mélanges argileux de l'étude : a) ATG –ATD et d) amortissement lors d'une première chauffe, b) TMA et c) module de Young lors d'un premier cycle thermique.

La deuxième étape de ces travaux vise à diminuer la température de cuisson par une incorporation d'agents fusibles susceptibles d'être des accélérateurs du développement du flux vitreux, et donc réduire la consommation d'énergie lors de la cuisson et diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Deux additifs ont été choisis pour cette étude suivant des critères tels que la diminution de la tension superficielle et de la viscosité de la phase liquide créée.

2. Perspectives

Les prochains programmes expérimentaux consisteront à :

- approfondir l'analyse des résultats obtenus concernant le comportement dans le domaine à basse température,
- poursuivre l'étude spécifique du comportement dans le domaine haute température notamment en ce qui concerne le flux vitreux (sa localisation, sa cinétique de développement, sa composition chimique, etc.),
- comprendre les mécanismes physico-chimiques induits par l'ajout d'additifs favorisant l'apparition du flux vitreux,
- réaliser une étude cinétique du frittage [2],
- établir une démarche de modélisation des évolutions microstructurales à haute température du mélange C soumis ou non à une incorporation d'additifs.

3. Références bibliographiques

[1] C. A. Jouenne, Traité de céramique et matériaux minéraux, Septima, 2001.

[2] R. Sani, Étude des transformations microstructurales de mélanges argile/ Combustibles Solides de Récupération (CSR) lors de la cuisson : relations entre propriétés physico-chimiques, mécaniques et thermiques, 2018.

Formulation de dispersions aqueuses d'imprégnation pour l'élaboration de matériaux thermoplastiques à base de fibres de carbone

Doctorant : Vivien Nouri[1]
Encadrants : Emile PEREZ[2], Olivier DE ALMEIDA[3]

[1] *vivien.nouri@chomarat.com*
[2] *perez@chimie.ups-tlse.fr*, [3] *olivier.dealmeida@mines-albi.fr*

Résumé — Ce projet de thèse contribue pour la société CHOMARAT au développement de pré-imprégnés composites à matrice thermoplastique PAEK. Pour cela, des formulations aqueuses d'imprégnation innovantes sont réalisées au sein de l'équipe SMODD du laboratoire des IMRCP à Toulouse. Les formulations les plus prometteuses sont ensuite testées sur le pilote d'imprégnation de l'IRT Saint Exupéry de Toulouse pour évaluer leur performance pour l'imprégnation de renforts. Les différents matériaux produits sont alors caractérisés au sein de l'axe MAPP de l'Institut Clément Ader d'Albi.

Abstract — This thesis project contributes for CHOMARAT to the development of PAEK thermoplastic matrix composite prepregs. For this purpose, innovative aqueous impregnating formulations are carried out within the SMODD team of the IMRCP laboratory in Toulouse. The most promising formulations are then tested on the impregnation pilot of IRT Saint Exupéry of Toulouse to evaluate their performance for the impregnation of reinforcements. The different materials produced are then characterized within the MAPP axis of the Clément Ader Institute in Albi.

Descriptif du projet

Dans de très nombreux domaines, il y a un besoin croissant de matériaux toujours plus performants, tout en étant durables et respectueux de l'environnement. Dans ce contexte les matériaux polymères thermoplastiques renforcés par des fibres de carbone sont de plus en plus recherchés [1].

La fabrication de pré-imprégnés thermoplastiques est toutefois une opération complexe et coûteuse : cette imprégnation de renfort est généralement réalisée à l'état fondu au moyen de presses chauffantes continues ou par des voies solvant [2]. L'application de ces procédés au cas des matrices hautes performances, telles que les PAEK, est néanmoins extrêmement difficile à mettre en œuvre.

La mise en œuvre des ces matériaux composites thermoplastiques doit ainsi faire appel à de nouveaux procédés d'élaboration, adaptés à leurs caractéristiques physico-chimiques. L'imprégnation par immersion des renforts dans un bain aqueux de thermoplastique en suspension est une voie prometteuse pour atteindre des cadences de production et une qualité d'imprégnation élevées.

L'objectif de cette thèse est de développer des suspensions aqueuses d'imprégnation répondant au cahier des charges de la société CHOMARAT. Pour cela un choix minutieux des additifs utilisés pour stabiliser le polymère a été réalisé. Différentes formulations ont été développées au laboratoire des IMRCP en étudiant par exemple leur vitesse de sédimentation ou la taille des particules en suspension.

Deux exemples de formulations sont présentés sur la figure 1. Les photos sont prises après plusieurs jours de stockage. On remarque à gauche une formulation stable présentant un très léger déphasage et à droite une formulation instable présentant une forte sédimentation.

Figure 1 – Exemple de formulation : à gauche stable, à droite instable

Les formulations les plus prometteuses ont été testées sur la ligne pilote d'imprégnation de l'IRT St Exupéry de Toulouse afin de produire des matériaux pré-imprégnés.

Ces matériaux sont ensuite étudiés morphologiquement au sein de l'ICA. La figure 2 montre un exemple d'observation microscopique de ce type de matériaux.

Figure 2 – Observation microscopique d'un matériau préimprégné

Dans la suite du projet une caractérisation détaillée en termes de taux de porosités et d'homogénéité des différents matériaux pré-imprégnés sera réalisée. L'impact des morphologies sur la consolidation sera étudié, pour cela les matériaux seront consolidés de manière identique en étuve. Les produits consolidés seront ensuite caractérisés morphologiquement.

Une seconde campagne/étape de consolidation sous presse chauffante sera également réalisée afin d'étudier les propriétés mécaniques des matériaux. De cette manière il sera possible de faire le lien entre les propriétés mécaniques des matériaux composites et la formulation utilisée initialement.

Références

[1] D. Gay. *Composite Materials: Design and Applications*, CRC Press, 2014

[2] A.L. Ogden, M.W. Hyer, G.L Wilkest, A.C. Loos. The Development of an Alternative Thermoplastic Powder Prepregging Technique, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. V, Pag.14-31, 1992.

Modélisation de la phase de fusion/imprégnation dans le procédé de fabrication de tape composite thermoplastique

Doctorant : Jennifer MACKIE[1]
Encadrants : Fabrice SCHMIDT[2], Olivier DE ALMEIDA[3], Karine Labastie[4], Bénédicte Reine[5]

[1] jennifer.mackie@irt-saintexupery.com
[2] fabrice.schmidt@mines-albi.fr [3] olivier.dealmeida@mines-albi..fr , [4] karine.labastie@irt-saintexupery.com,
[5] benedicte.reine@irt-saintexupery.com ...

Résumé — Présentation d'une stratégie de modélisation pour simuler l'étape de chauffage dans le procédé en continu de fabrication de pré-imprégnés thermoplastiques par imprégnationen voie aqueuse. Un modèle de lampe IR à réflecteur intégré, à émission non Lambertienne, a été établi. Ce modèle est ensuite appliqué pour simuler le chauffage d'un four convecto-radiatif complexe. Les résultats de cette simulation sont comparés avec des données expérimentales issues d'essais de chauffage dans le four IR utilisant une plaque ABS instrumentée.

Abstract — A strategy to model the heating stage in the fabrication process of thermoplastic prepregs by continuous impregnation using a slurry powder technique is proposed. First a model for an IR lamp with an integrated reflector is established. This model is then implemented to simulate heating in a complex convecto-radiative oven. The results of this simulation were compared to experimental measures taken using an instrumented panel in the IR oven.

1. Introduction

Cette étude propose une stratégie pour simuler l'étape de chauffage dans le procédé de fabrication de pré-imprégnés carbone/thermoplastique par imprégnation en voie aqueuse. Dans ce procédé, après imprégnation des fibres de carbone par du PEKK (Poly-Ether-Ketone-Ketone) sous forme de poudre, le produit est chauffé à l'aide d'un four infrarouge (IR). Cette étape a pour but, dans un premier temps, d'évaporer la phase aqueuse du bain contenue dans la mèche, puis de faire fondre le polymère. Or, ces phénomènes dépendent fortement de la température, ce qui nécessite une modélisation avancée des transferts de chaleur au sein du four IR.

2. Résultats

2.1. Emetteur infrarouge

Dans la littérature la majorité des modèles de fours sont proposés pour des lampes claires à émission Lambertienne [3]. Ces lampes sont alors simplement modélisées par un cylindre équivalent représentatif du filament spiralé de tungstène et le flux isotrope émis par le cylindre dépend alors uniquement de la température et de l'émissivité du tungstène.

Néanmoins dans le cadre de cette étude, des lampes tubulaires avec un revêtement sur la face arrière (réflecteur intégré) sont utilisées (Figure 1). Ce réflecteur intégré modifie fortement la distribution spatiale de l'émission, de ce fait la modélisation des lampes ne peut plus être représentée par un cylindre à émission Lambertienne [2]. Cette étude propose ainsi une méthode des radiosités prenant en compte l'émission spatiale de la lampe sans prendre en compte explicitement le réflecteur en termes d'échanges radiatifs.

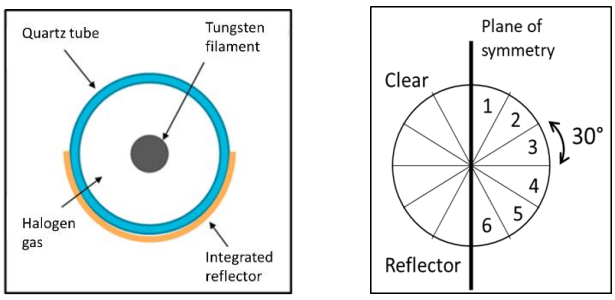

Figure 1 – Schématisation et modélisation d'une lampe infrarouge avec réflecteur intégré

Afin de prendre en compte l'effet du réflecteur intégré, les lampes ont été modélisées par un cylindre équivalent, comme dans le cas d'une lampe claire, mais le flux surfacique a été distribué de façon hétérogène sur la circonférence de l'émetteur à l'aide d'un facteur de pondération affecté à différents quartiers de la lampe.

2.3. Caractérisation par analyse inverse

L'identification de ces facteurs de pondération a été réalisée par analyse inverse. Pour ce faire une plaque d'ABS (Acrylonitrile-Butadiène-Styrène), dont les propriétés thermo-physiques et optiques sont connues [1], a été chauffée à l'aide de la lampe pour différentes orientations du réflecteur intégré. Les champs de température ont été relevés en face arrière au moyen d'une caméra IR (FLIR SC325 [7.5-13] µm). Les données de température ont ensuite été transférées vers le logiciel commercial de calcul par élément-fins –COMSOL Multiphysics®- afin d'estimer les paramètres du modèle : la température du cylindre équivalent et la fonction de distribution du flux radiatif.

3. Conclusions et perspectives

La modélisation d'une lampe infrarouge avec réflecteur intégré a été étudiée. Ce modèle sera ensuite implémenté dans une modélisation plus globale du four IR de la ligne d'imprégnation, incluant les réflecteurs et plaques en verre. Les résultats seront comparés avec des données expérimentales, obtenues en chauffant une plaque instrumentée en ABS, afin de valider la modélisation. Suite à cette modélisation la caractérisation des propriétés thermo-physiques et optiques du pré-imprégné carbone/PEKK lors de son séjour dans le four, en prenant en compte l'évolution sa composition et les changements de phase (eau et résine) sera effectué. Ces propriétés, couplées à la modélisation du four, permettront de prédire l'évolution de la température du pré-imprégné durant son séjour dans le four IR.

Références

[1] S.Andrieu. Etude experimental et numérique du chauffage infrarouge de plaques thermoplastiques pour le thermoformage. *Paris, ENMP*. 2005.

[2] B.Cosson, F. Schmidt, Y. Le Maoult, M. Bordival. Infrared heating stage simulation of semi-transparent media (PET) using ray tracing method. *Int. J. Mater. Form.* Vol 4, Num 1, Pag. 1-10, 2011.

[3] M. Pettersson, S. Stenström. Modeling of an electric IR heater at transient and steady state conditions: Part I: model and validation. *Int. J. Heat Mass Transf.* Vol 43, Num 7; pp 1209-1222, 2000.

Élaboration de composites à matrice céramique par des procédés voie liquide

Doctorant : Florian BOUTENEL[1]
Encadrants : Thierry CUTARD[2], Gilles DUSSERRE[3]

[1] *florian.boutenel@mines-albi.fr*
[2] *thierry.cutard@mines-albi.fr*, [3] *gilles.dusserre@mines-albi.fr*

Résumé — Cette thèse s'intéresse à l'élaboration de composites à matrice céramique (CMC) oxyde/oxyde par des procédés voie liquide de type RTM (*Resin Transfer Molding*) et LRI (*Liquid Resin Infusion*). L'objectif de cette étude est d'identifier et de comprendre les relations procédé/microstructure/propriétés. En particulier, ces travaux se focalisent sur la formulation de suspensions à partir de poudres céramiques, l'imprégnation du renfort fibreux par la suspension, la consolidation de la matrice par frittage et la caractérisation mécanique du composite.

Abstract — This PhD thesis deals with the liquid processing of oxide/oxide ceramic matrix composites (CMC) by Resin Transfer Molding (RTM) and Liquid Resin Infusion (LRI). The objective of this study is to identify and understand the relationships between processing/microstructure/properties. In particular, this work focuses on the formulation of suspensions using ceramic powders, the impregnation of the fiber reinforcement with the suspension, the consolidation of the matrix by sintering and the mechanical characterization of the composite.

1. Introduction

Les acteurs de l'industrie aéronautique souhaitent poursuivre les gains de masse sur les avions, notamment en substituant les superalliages actuels par des composites à matrice céramique (CMC) dans les zones moteur. Toutefois, les procédés actuels, associés à ce type de matériaux, sont complexes et coûteux, limitant ainsi leur incorporation massive dans les structures aéronautiques, en particulier civiles.

Cette thèse s'intéresse à l'élaboration de composites à matrice céramique par des procédés voie liquide de type RTM (*Resin Transfer Molding*) et LRI (*Liquid Resin Infusion*). Aussi, l'objectif de cette étude est d'identifier et de comprendre les relations procédé/microstructure/propriétés.

Le cas d'un CMC oxyde/oxyde est au centre de ces travaux. Celui-ci est constitué de fibres Nextel™ 610 en alumine-α pure et d'une matrice bi-composant {alumine + silice} dans des proportions proches de celles de la mullite. Aussi, ce composite repose sur le concept de *Weak Matrix Composites* [2] où la tolérance à l'endommagement est assurée par une porosité matricielle de l'ordre de 30 à 40 %vol.

2. Avancement des travaux

2.1. Formulation de suspensions à partir de poudres céramiques

La formulation de suspensions représente la première étape essentielle de la mise en œuvre. Elle doit permettre d'obtenir une suspension stable, bien dispersée et de faible viscosité (< 1 Pa.s) qui pourra, par la suite, imprégner correctement le renfort fibreux [1]. Ainsi, la formulation d'une suspension bi-composant, à partir d'alumine submicronique et de silice colloïdale, a été étudiée à travers des mesures de potentiel zêta et des essais de sédimentation, de rhéologie et de mouillabilité. L'ensemble de ces essais a été réalisé en collaboration avec Anne Aimable et Thierry Chartier de l'Institut de Recherche sur les Céramiques de Limoges (IRCER). Après avoir identifié un dispersant

adapté à cette suspension, la quantité optimale de ce composé, permettant une bonne dispersion de l'alumine, a été déterminée. Au regard du temps de mise en œuvre, la suspension ne présente pas de sédimentation significative. Aussi, sa mouillabilité, sur un substrat d'alumine, est facilitée par l'utilisation, en faible quantité, d'un tensioactif.

2.2. Comportement rhéologique des suspensions

La viscosité de la suspension est un élément clé de la mise en œuvre par voie liquide. Ainsi, une étude approfondie du comportement rhéologique des suspensions a été menée en combinant des approches expérimentales et numériques (Figure 1).

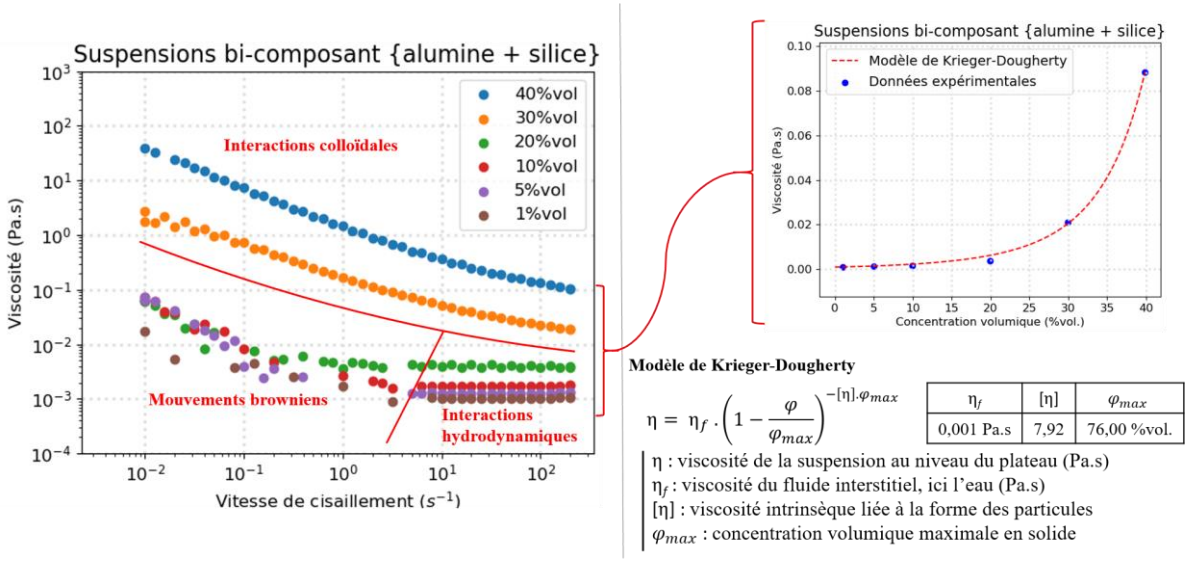

Figure 1 – Étude du comportement rhéologique de suspensions bi-composant {alumine + silice}.

Suivant la concentration volumique en solide et la vitesse de cisaillement, les mouvements browniens, les interactions colloïdales ou les interactions hydrodynamiques conditionnent le comportement rhéologique de la suspension. En particulier, dans le cas de la dominance des interactions hydrodynamiques, la viscosité de la suspension dépend de la concentration volumique en solide et peut être modélisée par un modèle de Krieger-Dougherty.

3. Conclusion et perspectives

Les premiers résultats obtenus ont permis de formuler des suspensions céramiques stables, bien dispersées, pour lesquelles une compréhension fine du comportement rhéologique a été acquise. Les prochaines étapes du plan de travail de la thèse visent à étudier, d'une part, la répartition des particules au sein du renfort fibreux suite à l'étape d'imprégnation (à travers des observations microscopiques et des mesures de porosité) et, d'autre part, la consolidation de la matrice par frittage (à travers l'étude de la microstructure de la matrice). Une caractérisation mécanique du composite pourra également être menée.

Références

[1] C. Billotte, E.D. Fotsing, E. Ruiz. Optimization of alumina slurry for oxide-oxide ceramic composites manufactured by injection molding, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2017, Article ID 2748070, 9 pages, 2017.

[2] F.W. Zok, C.G. Levi. Mechanical properties of porous-matrix ceramic composites, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 3, Num. 1-2, Pag. 15-23, 2001.

Étude tribologique des nanocomposites à matrice thermoplastique PAEK

Doctorant : Marie DOUMENG[1]
Encadrants : Florentin BERTHET[2], Karl DELBE[3], Jean DENAPE[4], France CHABERT[5]

[1] *mdoumeng@enit.fr*
[2] *florentin.berthet@mines-albi.fr*, [3] *kdelbe@enit.fr*, [4] *jdenape@enit.fr*, [5] *fchabert@enit.fr*

Résumé — Pour des applications hautes performances, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés. Le but de ce projet de recherche est de prévenir l'usure des matériaux composites en conditions extrêmes. Pendant ma thèse, je formule de nouveaux composites à matrice thermoplastique PEEK dans lesquels je rajoute des particules céramiques, pour améliorer ses propriétés mécaniques en volume et en surface. Je réalise des tests de frottement sur ces matériaux à température et humidité contrôlées, ce qui conduit à leur usure. Puis, j'analyse l'évolution des modifications morphologiques et chimiques des matériaux.

Abstract – In high-performance applications, composite materials are widespread. The aim of this research topic is to prevent wear of composite materials in severe environments. During my thesis, I formulate new composite materials with PEEK thermoplastic matrix which are reinforced with ceramic particles, in order to improve their mechanical properties in the volume and in the surface. I do tribological tests on these materials at controlled temperature and humidity, which conduct to wear. Then, I analyse morphological and chemical modifications of these materials.

1. Contexte

Les composites étudiés sont ceux à matrice en polyétheréthercétone (PEEK), un thermoplastique déjà utilisé dans des applications hautes performances en raison de ses propriétés mécaniques, sa résistance aux attaques chimiques et sa stabilité thermique. De plus, il est facile à mettre en forme et retardateur de flamme, mais également biocompatible.

De précédentes études montrent que l'ajout de particules améliore les propriétés tribologiques, mais les causes de ces améliorations sont souvent phénoménologiques. Ainsi, ce projet vise à comprendre l'effet de la nature chimique, de la conductivité thermique, de la taille et du taux de particules dans les composites à matrice PEEK, ce qui ouvrira la possibilité de les utiliser davantage dans de nouvelles applications.

2. Cristallinité du PEEK

La microstructure du PEEK, en particulier la cristallinité, influence les propriétés mécaniques du polymère dans son volume, mais qu'en est-il en surface ? Aucune étude ne relate un changement ou non de cristallinité sur la zone d'usure et encore moins s'il y a un lien avec les mécanismes d'usure. Plusieurs techniques permettent de déterminer le taux de cristallinité d'un polymère. Parmi celles-ci, la spectroscopie Raman permet l'analyse de surfaces inférieures à 500 µm, et autorise la caractérisation avec précision de la zone d'usure. C'est cette technique non destructive qui est utilisée dans ces travaux de recherche [1]. Stuart [2] a identifié les spectres correspondants à l'état cristallin et amorphe du PEEK. Sur la base de ses résultats, une corrélation inédite a été faite entre la cristallinité du polymère et les propriétés tribologiques.

3. Influence de la taille et du taux de particules

Les propriétés des composites sont différentes selon la taille des particules nanométriques ou micrométriques. En effet, le rapport surface/volume est plus de dix fois plus élevé pour les nanoparticules que pour les tailles micrométriques. Par exemple, les nanocomposites sont plus résistants à la chaleur et plus tenaces. Ces propriétés dépendent des dimensions et de l'adhésion à l'interface entre le renfort et la matrice. Les premiers essais montrent des améliorations pour les propriétés de frottement. Le coefficient de frottement est réduit avec des nanoparticules de carbure de silicium. Pour le confirmer, deux échelles de particules — nanométriques ou micrométriques — sont étudiées dans la thèse. Les particules ont été choisies de façon judicieuse pour améliorer les propriétés à la fois de volume et de surface avec des éléments connus pour leurs propriétés de lubrification :

- Composés lamellaires : nitrure de bore hexagonal (h-BN) et graphite ;
- Particules céramiques : alumine (Al_2O_3) et carbure de silicium (SiC).

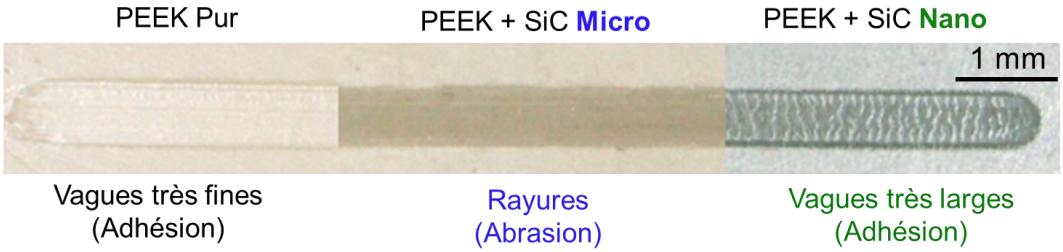

Figure 1 : Images des traces d'usure de PEEK et de PEEK renforcés avec des nanoparticules et des microparticules de carbure de silicium prises au microscope optique

Ces particules augmentent également la conductivité thermique du matériau composite. Par conséquent, l'énergie créée lors du frottement est dissipée plus rapidement. Il faudra comprendre l'impact de cette dissipation de chaleur sur la durabilité du matériau. Après avoir fabriqué les composites au laboratoire, pour maîtriser pleinement leurs caractéristiques, les essais tribologiques permettent d'user le matériau dans des conditions contrôlées. Des analyses morphologiques (Figure 1) et structurales apportent des éléments pour améliorer la compréhension des mécanismes d'endommagement et d'usure.

3. Perspectives

Ce projet de thèse est une première étape vers la compréhension des phénomènes d'usure et d'endommagement des matériaux à matrice PEEK. Une meilleure maîtrise des procédés de mise en forme des matériaux polymères (compression, extrusion, injection, usinage) et des comportements de ces matériaux en service seront possibles pour concevoir des systèmes plus fiables et moins coûteux dans de nombreux domaines d'applications : médical, aéronautique, spatial, automobile ou électronique embarquée.

Références

[1] M. Doumeng, F. Ferry, K. Delbé, T. Mérian, F. Chabert, F. Berthet, O. Marsan, V. Nassiet, J. Denape. Evolution of crystallinity of PEEK and glass-fibre reinforced PEEK under tribological conditions using Raman spectroscopy, *Wear*, Vol. 426–427 Part B, Pag.1040-1046, 2019.

[2] B. Stuart, B. Briscoe. A Fourier transform Raman spectroscopy of poly (ether ether ketone)/polytetrafluoroethylene (PEEK/PTFE) blends, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, Vol. 50, Num. 11, Pag.2005-2009, 1994.

Suivi de la santé structurale des infrastructures en bois par intégration de capteurs

Doctorant : Placide UWIZEYIMANA[1]
Encadrants : Florent EYMA[2], Marianne PERRIN[3]

[1] *placide.uwizeyimana@iut-tarbes.fr*
[2] *florent.eyma@iut-tarbes.fr*, [3] *marianne.perrin@iut-tarbes.fr*

Résumé — Aujourd'hui une forte expansion d'ouvrages d'art en bois est favorisée par l'utilisation de bois lamellé-collé (LC). Ce produit innovant et de haute technologie a permis de répondre aux problématiques de développement durable. Par son caractère renouvelable, naturel et écologique, le bois devient donc un matériau de construction privilégié. Néanmoins, la variation de l'humidité ou les cycles climatiques d'humidification/ séchage impactent la durabilité de ce matériau. L'objectif de ce travail s'oriente donc vers le suivi de l'humidité du bois LC et l'étude de l'influence de sa variation sur les propriétés mécaniques des poutres LC.

Abstract — Today, a strong expansion of timber bridges is promoted by using glulam. This innovative and high technology product has allowed for responding to sustainable development issues. Advantageous properties such as renewability, natural and ecologic make the timber an excellent material to use in construction. However, moisture content (MC) variation or climatic wetting/drying cycles affect the durability of this material. This study is dedicated to the MC monitoring of glulam and the study of influence of MC variation to the mechanical properties of glulam beams.

1. Introduction

Depuis quelques décennies, l'utilisation du bois dans le génie civil devient une solution intéressante face aux problématiques de développement durable. En effet, son caractère renouvelable, naturel et écologique lui permet d'être intégré de plus en plus souvent dans les constructions. Ce matériau, puits de carbone, consomme peu d'énergie pour sa production et sa transformation et contribue même à diminuer les émissions de dioxyde de carbone. Si l'on ajoute à cela, le développement de produits innovants et de haute technologie comme les éléments en lamellé-collé (LC), on observe aujourd'hui une forte expansion d'ouvrages en bois. C'est ainsi que ces dix dernières années, de nombreux ouvrages d'art en bois ont vu le jour sur le territoire français (SETRA 2006). Cependant, étant exposées aux conditions environnementales extérieures, les poutres LC des ouvrages présentent des problèmes de dégradations liés aux cycles d'humidification/séchage (H/S) tels que la délamination, la fissuration et les phénomènes de retrait/gonflement affaiblissant ainsi leurs propriétés mécaniques. Il est donc primordial d'apporter une démarche de surveillance en adéquation afin de permettre aux gestionnaires d'ouvrages d'intervenir au plus vite dès que le risque de pathologie survient. Afin de répondre à cette problématique, cette étude mettra en valeur la technique de suivi de l'humidité par méthode électrique et permettra d'exprimer l'affaiblissement des propriétés mécaniques des poutres LC en fonction des cycles H/S. La méthode électrique consiste à mesurer l'humidité du matériau par l'intermédiaire de variations de la résistance électrique. La littérature présente plusieurs techniques de mesure de l'humidité par méthodes électriques (Li et al. 2017 ; Fredriksson et al. 2013). Parmi elles, l'utilisation de capteurs surfaciques s'est avérée particulièrement pertinente pour mesurer l'humidité des poutres LC (Li et al. 2017).

2. Campagne expérimentale

Afin d'identifier et valider la technique d'instrumentation des poutres LC, une série d'essais a été d'abord réalisée. L'objectif est d'utiliser la technique identifiée pour suivre l'humidité au cours des cycles H/S. Dans un premier temps, la taille et la position des électrodes (capteurs) surfaciques ont été identifiées. Pour cela, cinq diamètres d'électrodes et six espacements entre l'électrode et le bord de l'échantillon ont été étudiés. En second lieu, l'influence de l'humidité et de la variation de la température sur la résistance électrique a été étudiée. Le but étant d'établir une courbe d'étalonnage permettant d'exprimer l'humidité du bois LC en fonction de sa résistance électrique. Etant donné que le bois utilisé dans les ouvrages d'art est généralement soumis à des sollicitations de flexion, l'influence de la présence des capteurs entre les lamelles sur la résistance à la rupture et le module d'élasticité en flexion des poutres LC a été étudiée. La Figure 1 présente les positions des capteurs dans le plan de collage d'une poutre LC.

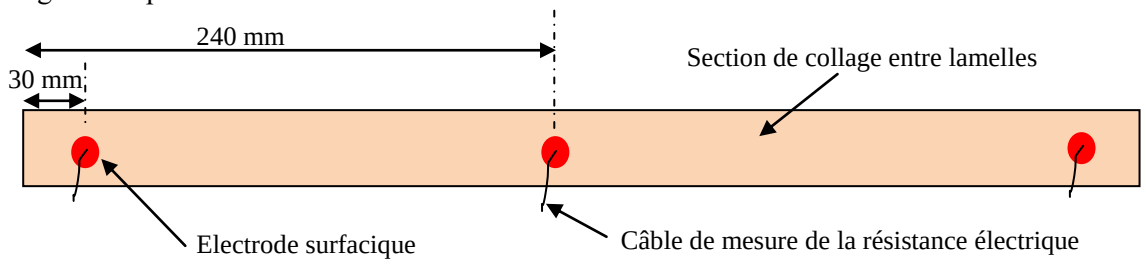

Figure 1: Positions des électrodes entre les lamelles d'une poutre LC

3. Conclusions et perspectives

Les résultats obtenus montrent que la résistance électrique diminue avec l'augmentation du diamètre de l'électrode et de l'espacement entre l'électrode et le bord de l'échantillon. Ces résultats nous ont permis de choisir les électrodes de 10 mm de diamètre. Ensuite, nous avons défini une courbe d'étalonnage permettant d'obtenir l'humidité à partir de la résistance électrique mesurée. L'étude de l'influence de la température montre que la résistance électrique présente une diminution logarithmique en fonction de l'augmentation de la température. Finalement, les essais de flexion ont montré que les capteurs intégrés entre les lamelles n'ont pas d'influence sur la résistance à la rupture et le module d'élasticité en flexion des poutres LC.

Les prochaines étapes seront les suivantes : De mai à septembre 2019, nous allons réaliser les essais de validation du système de mesure de l'humidité en continu au cours des cycles H/S. D'octobre 2019 à mars 2020, les essais de durabilité accélérés seront réalisés afin de mettre en évidence l'influence des cycles d'humidification/séchage sur les propriétés mécaniques des poutres LC. La période d'avril à octobre 2020 sera dédiée à la réalisation des essais complémentaires nécessaires (essais de durabilité en extérieur, ...), à la rédaction d'un article mais aussi du manuscrit de thèse et à la préparation de la soutenance de thèse.

Références

[1] H. Li, M. Perrin, F. Eyma, X. Jacob, V. Gibiat. Moisture Content Monitoring in Glulam Structures by Embedded Sensors via Electrical Methods, Wood Sci. Technol 52:733-752, 2017.

[2] M. Fredriksson, L. Wadso, P. Johansson. Small resistive wood moisture sensors: a method for moisture content determination in wood structures, Eur. J. Wood Prod 71:515-524, 2013.

[3] SETRA, Les *ponts en bois : Comment assurer leur durabilité*, Guide technique du SETRA (Service d'études technique des routes et autoroutes), 2006.

High-Temperature Digital Image Correlation method applied for Titanium alloys forming

PhD student: Phuong LUONG[1]
Supervisors: Rébecca BONNAIRE[2], Luc PENAZZI[3]

[1] *linh-phuong.luong@mines-albi.fr*
[2] *rebecca.bonnaire@mines-albi.fr*, [3] *luc.penazzi@mines-albi.fr*

Résumé —L'objectif global de la thèse est de développer une méthodologie permettant d'obtenir une mesure de champs cinématique par la méthode de corrélation d'image (DIC) lors de la phase de refroidissement de pièces en alliage de titane Ti-6Al-4V après emboutissage à chaud ou formage superplastique (SPF). La première partie de la thèse concerne la réalisation de mouchetis répondant aux besoins de la méthode. Ces mouchetis sont fabriqués à partir d'un modèle numérique par différentes techniques et analysés à des températures de 600 °C et 700 °C. Les résultats conduisent à la proposition de méthodes adaptées à la mesure par DIC à haute température.

Abstract —Global aim of the PhD thesis is to develop a measurement technique to obtain kinematic fields by Digital Image Correlation (DIC) during the cooling phase of Ti-6Al-4V piece after hot stamping process or superplastic forming (SPF). The first part of PhD thesis deals with speckle fabrication methods that meet requirements of DIC. Speckle patterns are made of different fabrication techniques by numerical speckle patterns. Images of the speckled are analysed then compared in terms of speckle radius, contrast, etc. at 600°C and 700°C. In conclusion, two methods for making a speckle suitable under high temperature suggested.

1. Introduction

Ti-6Al-4V titanium alloy is actually widely used in aero-structures because of excellent performance: high mechanical specific resistance and low corrosion at high temperature. Some parts such as pylon or air inlet present complex shape. They are usually manufactured by hot stamping in which temperatures are generally from 600°C to 800°C. One of the challenges of this process is to control the distortion of the part after the entire procedure.

In order to reduce manufacturing costs and limits the number of recovering induced in this context, numerical simulations are usually used to predict final shapes. To improve the thermo-mechanical models, the identification of constitutive parameters and the validation of the numerical simulations would benefit from continuous full-field kinematic measurement during different production steps by Digital Image Correlation (DIC). Although this method is relatively mastered at room temperature, it is more complex to implement at high temperature (typically from 600°C to 800°C). This is due to a number of factors, including the mirage effect (gradient of refractive index), the loss of image contrast and the speckle flaking observed during thermo-mechanical experiments.

The PhD thesis is proceeded in 4 phases. The first phase deals with the speckle fabrication method in the conditions of hot stamping process. The second phase details the characterization of kinematic measurement by DIC at high temperature. The third one suggests correction methods dealing with problem of the loss of contrast and mirage effect on 2D-geometry specimens. The final phase is evaluating correction methods proposed on phase 3 with a generic 3D geometrical pieces during the cooling phase.

2. Methodology, main results and discussion on phase 1

The first phase of PhD thesis focusses on fabrication methods of speckle, its characteristics at high temperature and its adherence to the part when subjected to large strain.

Six different speckle preparation techniques are produced thanks to numerical generator in order to compare objectively their performance. The six speckle methods can be divided into two categories: The first one, named “constructive” [1], method includes painting (M1) direct anodization (M2) and inverse anodization (M3) methods while the second category "destructive" [1] includes three techniques: Laser engraving (M4), combination between laser and anodization (M5) and combination between laser and painting (M6). Speckle obtained in the first category techniques is made by lithography technique using a polymer mask while the others (M5, M6, and M7) are made of laser source.

Results show that at 600°C, speckle made by combining laser and anodization method (M5) ensures the best quality (highest value of MIG "Mean Intensity Gradient" [1] and speckle sizes radius) meet “good” speckle criteria [2] and best adherence at maximum strain of 2 (Fig.1).

At 700°C, due to accelerated oxidation on non–protected surfaces, only speckle made by painting M1 and combining laser and paint M6 techniques present a higher contrast comparing with other one (Tab. 1). However, speckle flakes at plastic deformation with maximum strain of 0.2.

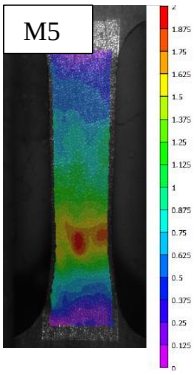

Fig. 1: Example of M5 specimen at 600 °C

R T			600°C			700°C	
Method	**Speckle radius [pixel]**	**Density**	**MIG**	**Relative decrease of MIG**	**ε max measure**	**MIG**	**Relative decrease of MIG**
M1	8±5	0.6	7.5	23	0.2	**7.5**	**23**
M2	18±17	0.3	5.2	67	NG	3.8	76
M3	17±61	0.4	NG	NG	NG	3.8	54
M4	3±2	0.1	7	29	2.0	3.9	61
M5	3±2	0.2	**16.3**	**0**	**2.0**	4.4	60
M6	3±5	0.3	12.4	11	0.2	**9.5**	**32**

Tab. 1: Quantitative performance of speckle made by different techniques at room temperature (RT), 600°C and 700°C. NG means Not Given

3. Conclusion and perspectives on phase 1

Speckle made of six different fabrication methods is successfully produced. A guideline for making a speckle suitable to perform mechanical tests under hot forming conditions is suggested. Perspectives on phase 1 are to: i) evaluate the adherence of speckle made on Ti-6Al-4V alloy of different techniques at 700°C and ii) develop a speckle method that meets “good speckle” criteria and good adherence on surface, e.g. golden coating method coupled with laser.

4. References

[1] Y.L. Dong, B. Pan. A review of speckle pattern fabrication and assessment for Digital Image Correlation, Experimental Mechanics, vol 57, p. 1161-1181, 2017.

[2] P. Reu. All about speckles. Experimental Mechanics, Vol. 38-39, p. 1-2, 2014-2015.

Performance Improvement of Embedded Electric Actuators by means of a Thermal Management Optimisation

Doctorant : Francesco DE GIORGI[1]
Encadrants : Marc BUDINGER[2], Ion HAZYUK[3], Jean-Charles MARE[4], Lionel YAPI[5], Jérôme SOCHELEAU[6]

[1] *degiorgi@insa-toulouse.fr*, [2] *mbudinge@insa-toulouse.fr*, [3] *hazyuk@insa-toulouse.fr*, [4] *mare@insa-toulouse.fr*, [5] *lionel.yapi@collins.com*, [6] *jerome.socheleau@collins.com*

Résumé — La réalisation d'avions plus électriques (MEA) a introduit le concept de système de commande de vol à source de puissance électrique. Les actionneurs de commande de vol hydrauliques conventionnels seront progressivement remplacés par les actionneurs électro-hydrostatiques (EHA) et électromécaniques (EMA). Ces derniers impliquent une gestion du transfert thermique afin d'éviter des échauffements très localisé qui pourrait affecter leurs performances et leur fiabilité. Cette thèse a pour objectif de proposer de stratégies pour améliorer les performances des actionneurs électriques grâce à une conception optimisé par rapport à la thermique.

Abstract — The realization of More Electric Aircraft (MEA) push toward the concept of electrically supplied flight control actuation system. The conventional hydraulic flight control actuators will be gradually replaced by the electro-hydrostatic (EHA) and electromechanical (EMA) actuators. The latter involve particular thermal transfer management to avoid highly localized heating which could affect their performance and reliability. This thesis aims to find new strategies in order to improve the performance of embedded electric actuators by means of an optimization design regarding the thermal constraint.

1. Summary of the work

The development of More Electric Aircraft, aimed to merge the hydraulic, pneumatic and electric power networks into a single electric one, provide for numerous benefits in terms of weight, operating costs, efficiency and so on at the expense of a more complex thermal management. An electrically supplied flight control actuation system becomes essential and the elimination of the hydraulic network involves cannot take benefit of the hydraulic fluid as convenient means of transporting and dissipating the heat generated by the energy losses produced by the system. Hence, the interest of this thesis which deals with the performance improvement of electric actuators by means of a thermal management optimisation. Three strategies have been identified for this purpose:

1. **Optimise the losses generation**: An optimal motor's design can be conducted with the aim of maximizing the torque to the mass ratio or the torque to square root of copper losses ratio.
2. **Improve the thermal transfer:** The thermal conduction and the natural convection can be improved by designing a motor housing with two optimum plate-fins natural convective heat sinks mounted on its sides. Another solution consist of transferring the heat to other actuators or aircraft's skin by means of heat pipes or thermal straps.
3. **Improve the transient generation and storage:** The power transistors switching strategy can be optimized in order to minimize the losses due to the actuator's control and phase change material (PCM) [1] to improve the transient storage.

In order to analyse and evaluate these strategies both a numeric and an experimental approach will be considered. The numeric work is meant to achieve two important objectives:

1. The definition of a procedure to conduct the preliminary design of electric actuators.
2. The realisation of a virtual prototype to evaluate the thermal dynamic behavior of the actuators.

In the first thesis part a focus has been made on the first objective. Firstly, the component models of the system have been defined. To conduct an optimal sizing study, estimations models [2] are generated: scaling laws, regression on data-sheet catalogues and analytical relationships have been used to estimate the dimensions and performance of bearing, screw-nut, gear-box and motor housing with fins [3], while an original approach of substitution models and choice of variables [4] has been established for the motor. Once generated and coupled the component models, the preliminary design of the actuation system has been conducted on the base of static specification extrapolated from a mission profile. To this purpose a tool has been developed in "Python" language to perform the design via an optimisation procedure with a view focused on the mass minimisation and thermal constraints satisfaction. This tool allows a certain degree of interchangeability of models' utilization to analyse and compare several architectures (gear/direct drive), or different technological solutions (ball/roller-screw, motor's type, cooling devices adopted etc.) with relatively low computation time (~2min).

The experimental work involves the realisation of a test bench representing the thermal conditions inside the environment within which the actuator is confined. The bench consists of a thermal box containing only the EMA's motor housings, on which the considered cooling modules will be implemented and inside which a heating element will be inserted to reproduce the heat generated by the EMA. In this way it is possible to simplify the measurements from a practical point of view and to easily test the various thermal bricks both individually and possible combinations between them. With the sizing tool development and test bench definition the first part of the thesis is completed.

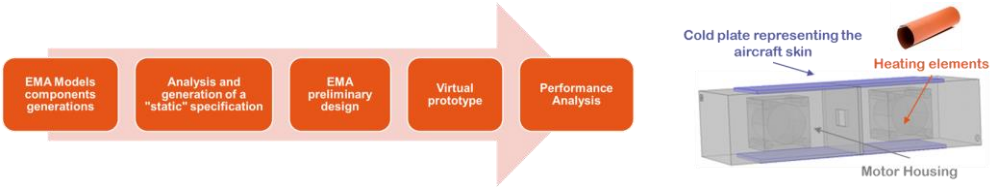

Figure 1 – Numeric work schedule and test bench definition.

2. Perspectives and plan of the future works

The finalization of the numeric work and the experimental test are expected. The generation of estimation models for the heat pipes, thermal straps and PCM is scheduled and their implementation in the sizing tool will be performed. Once validated the static design, the thermal dynamics will be evaluated with a virtual prototype implemented in "Modelica" language. In the meantime, the experimental tests will be conducted. When completed, the thesis will provide efficient means to size and benchmark thermal management solutions in function of the design drivers and specification.

References

[1] C.P. Lawson, J.M. Pointon. Lawson, C. P., & Pointon, J. M. (2008, September). Thermal management of electromechanical actuation on an all-electric aircraft, *26th International Congress of Aeronautical Sciences*, *ICAS-2008-6.6*, 2008.

[2] M. Budinger, J. Liscouët, F. Hospital, J.C. Maré. Estimation models for the preliminary design of electromechanical actuators, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 226(3), 243-259, 2012.

[3] A. Bar-Cohen, M. Iyengar, A. D Kraus. Design of optimum plate-fin natural convective heat sinks, *Journal of Electronic Packaging*, *125*(2), 208-216, 2003.

[4] F. Sanchez, M. Budinger, I. Hazyuk. Dimensional analysis and surrogate models for the thermal modeling of Multiphysics systems, *Applied Thermal Engineering*, 110, 758-771, 2017.

Identification de paramètres de comportement à partir de mesure de champs cinématiques

Doctorant : Guillaume COLANTONIO[1]
Encadrants : Eduard MARENIĆ[2], Jean-Charles PASSIEUX[3]

{ [1] guillaume.colantonio ; [2] marenic ; [3] *passieux* } *@insa-toulouse.fr*

Résumé — La récente mise au point d'un formalisme global de stéréo-corrélation, basée sur un maillage éléments finis permet de réaliser une mesure cinématique en 3D directement dans le repère physique.
Un avantage de cette méthode est l'expression de la mesure dans le même support de discrétisation que la simulation, ce qui permet de simplifier les dialogues entre les essais et les simulations. Cette caractéristique peut-être mise à profit par un algorithme de type « FEMU » afin d'identifier les paramètres d'une loi de comportement mécanique.

Abstract — The recent development of a global stereo digital image correlation formalism, based on a finite element mesh, allows to measure a 3D-kinematic field directly in the world coordinate system.
A benefit of this method is that the experimental measurement is expressed in the same discretization support as the simulation. Then dialogue between tests and simulations is simplified. "FEMU"-like algorithm can be used for the identification of the parameters of a constitutive law.

1. Introduction

Pour concevoir et dimensionner une structure, l'ingénieur s'appuie entre-autre sur des essais virtuels, qui sont régis par les conditions aux limites et les lois de comportement mécanique des matériaux utilisés. Il est donc nécessaire de caractériser expérimentalement, à partir d'essais mécaniques, les paramètres qui pilotent ces lois de comportement.

L'utilisation de la corrélation d'images numériques (*CIN*), qui permet de mesurer des champs de déplacement, est de plus en plus répandue en mécanique expérimentale. Avec l'objectif de caractériser plusieurs paramètres en même temps, dans des conditions toujours plus proches des conditions réelles, les méthodes de CIN basées sur l'utilisation d'un maillage éléments finis sont un atout. Elles permettent d'exprimer le champ cinématique expérimental dans le même support de discrétisation que celui du champ simulé et donc de simplifier le dialogue entre les essais et la simulation, qui est nécessaire à l'identification de paramètres.

La récente mise au point d'un formalisme global de stéréo-corrélation d'images numériques (*SCIN*), basée sur les éléments finis [2], permet en outre de réaliser une mesure de déplacement en 3D, directement dans le repère physique, et ainsi de caractériser plusieurs paramètres en même temps dans des cas de géométries et de cinématiques en trois dimensions.

2. Stéréo-corrélation d'images numériques

La SCIN permet, en s'appuyant sur l'exploitation d'un banc de plusieurs caméras, d'obtenir le champ de déplacement d'une surface dans les trois dimensions de l'espace [3].

Avant tout, il est nécessaire de calibrer le système de mesure, c'est-à-dire obtenir les paramètres du modèle de caméra et mesurer la forme de l'objet étudié. Ensuite, la mesure du champ de déplacement

est possible. Mathématiquement, il s'agira de trouver le champ de déplacement $\underline{\tilde{U}}$ permettant d'assurer la conservation du niveau de gris entre les images f_c et g_c vues par la caméra *c*. Il vérifie l'équation (1) :

$$\underline{\tilde{U}} = \underset{\underline{U}}{Argmin} \frac{1}{2} \sum_c \int \left(f_c(\underline{X}) - g_c(\underline{X} + \underline{U}(\underline{X})) \right)^2 d\underline{X} \quad \textbf{(1)}$$

3. Identification des paramètres d'une loi de comportement

À partir de la mesure du champ cinématique, il existe plusieurs méthodes permettant d'identifier les paramètres de la loi de comportement du matériau [1].

La figure 1 schématise le fonctionnement de l'une d'entre-elles : la méthode « FEMU » (*Finite Element Model Updating*). Il s'agit de comparer le champ de déplacement mesuré avec un champ simulé pour un certain jeu de paramètres. Puis de modifier les paramètres jusqu'à minimiser la différence entre ces deux champs.

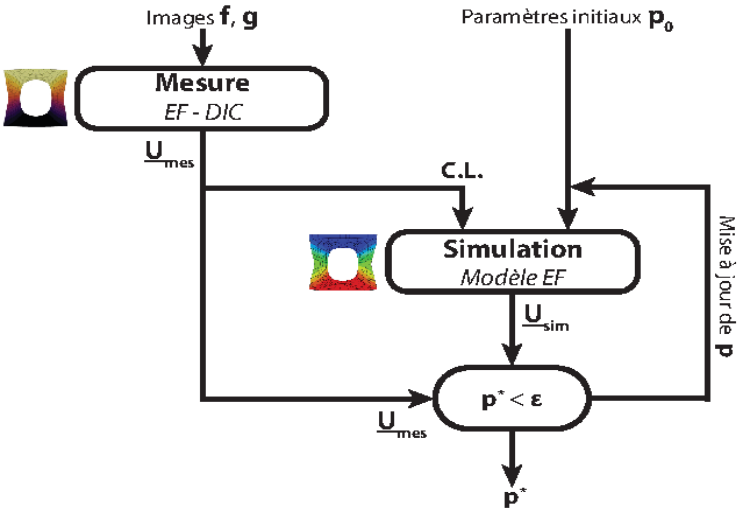

Figure 1 – Schématisation de l'algorithme FEMU.

4. Perspectives et conclusion

Afin d'améliorer l'identification il serait intéressant de proposer et tester différents moyens de régulariser le problème. De plus les conditions aux limites semblent également être particulièrement déterminantes, leur connaissance et leur évolution temporelle sera étudiée.

L'identification des paramètres d'une loi de comportement élasto-plastique pour une éprouvette trouée est étudiée. Il sera alors intéressant de comparer les paramètres identifiés avec les valeurs obtenues par des méthodes plus classiques, comme une identification basée sur de la CIN-2D.

Références

[1] S. Avril, M. Bonnet, A.S. Bretelle, M. Grédiac, F. Hild, P. Ienny, F. Latourte, D. Lemosse, S. Pagano, E. Pagnacco, F. Pierron. Overview of identification methods of mechanical parameters based on full-field measurement. *Experimental Mechanics*, 48(4):381-402, 2008.

[2] J.E. Pierré, J.C. Passieux, J.N. Périé. Finite Element Stereo Digital Image Correlation: Framework and Mechanical Regularization. *Experimental Mechanics*, 57(3) : 443-456, 2017.

[3] M.A. Sutton, J.J. Orteux, H. Schreier. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurement*. Springer US, New-York, 2009.

Optimisation de trajectoire pour la fabrication additive de pièces complexes par soudage à l'arc.

Doctorant : Adama Diourté[1]
Encadrants : Stéphane Segonds[2], Florian Bugarin[3], Cyril Bordreuil[4]

[1] Adama.diourte@univ-tlse3.fr
[2] stephane.segonds@univ-tlse3.fr , [3] florian.bugarin@univ-tlse3.fr, [4] cyril.bordreuil@umontpellier.fr

Résumé — Une nouvelle stratégie de génération de trajectoire continue est réalisée pour la technologie de fabrication additive par soudage à l'arc. Cette stratégie répond à la nécessité de limiter les phases d'amorçages/désamorçages de l'arc lors du procédé. En limitant ces phases, la qualité de la pièce sera meilleure grâce à la réduction des inclusions, des contraintes résiduelles et distorsions de la pièce. La stratégie utilise deux principaux avantages fournis par le procédé, les six degrés de libertés et la possibilité de moduler la hauteur de dépôt.

Abstract — A new continuous path generation strategy is implemented for wire arc additive manufacturing (WAAM). This strategy responds to the need to limit the arc Start/Stop phases during the process. By limiting these phases, the quality of the part will be improved by reducing residual stresses and distortions of the part. The strategy uses two main advantages provided by the process, the six degrees of freedom and the possibility of modulating the deposition height.

1. Introduction

Cette étude met place une nouvelle stratégie de génération de trajectoire d'outil, pour la fabrication de surface gauche, par la technologie de fabrication additive par soudage à l'arc [1]. Dans cette stratégie, l'objectif principal est de réduire le plus possible les phases d'amorçages et de désamorçages de l'arc électrique lors du processus de fabrication. Ces cycles induisent de fortes contraintes résiduelles et distorsions de la pièce. Pour atteindre cet objectif, la capacité de modulation de la hauteur de dépôt du cordon et la mobilité (5 axes) offerte par le procédé de fabrication seront utilisées.

2. Stratégie 2.5D

La stratégie actuelle de génération de trajectoire dans le WAAM, comme dans toutes les autres technologies de fabrication additive, est celle de la stratégie 2.5D[2]. La CAO est découpée, en calculant l'intersection avec différents plan parallèles, distants les uns des autres de la hauteur de dépôt (Figure 1.a).

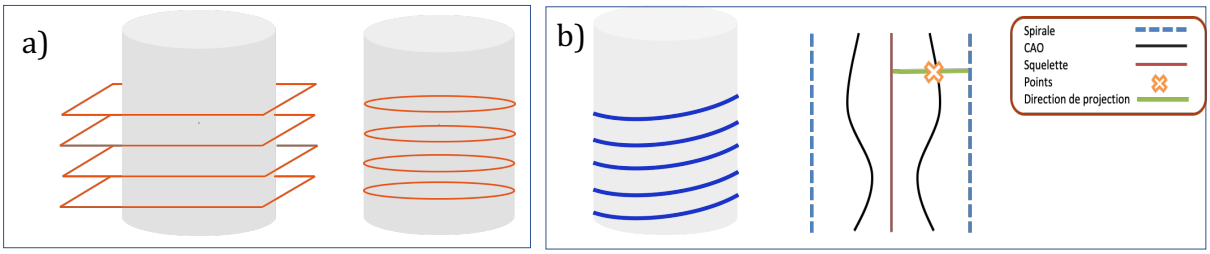

Figure 1 – a) Stratégie 2.5D b) Stratégie 3D développée

Cette stratégie n'utilise ni l'ensemble de degrés de liberté offert par le procédé ni la possibilité de moduler la hauteur du cordon au cours du dépôt, de plus elle implique l'amorçage/désamorçage de l'arc pour chaque nouvelle couche. Les pièces issues de cette stratégie sont en extrusion simple, ce qui limite la complexité des pièces fabriquées.

3. Stratégie développée

Afin de générer une trajectoire sur une pièce quelconque, une trajectoire continue (un amorçage/désamorçage) est d'abord générée sur un volume simple, enveloppe de la pièce à réaliser, dont on connait l'équation, ici la trajectoire continue est une spirale et le volume enveloppe un cylindre (Figure 1.b). Ensuite les points composants cette spirale sont projetés sur le squelette de la géométrie à fabriquer. Ces projetés sont reliés aux points de la spirale par une droite, l'intersection de ces droites avec la pièce décrit la trajectoire (Figure 1.b). Cette démarche permet d'obtenir une trajectoire continue sur la surface de la pièce à fabriquer mais elle n'est pas forcément conforme pour la fabrication car la hauteur de dépôt peut se trouver en dehors de l'intervalle admissible de modulation (±10% du dépôt moyen). Une phase dite de régularisation est nécessaire pour ramener les points dans cet intervalle.

La réalisation d'une pièce de révolution ayant une section variable, avec une grande variation de courbures (Figure 2) a permis de valider cette stratégie. La fabrication de cette pièce a une durée de 45 min avec seulement un amorçage/désamorçage de l'arc, l'état de surface pourrait être amélioré en optimisant les paramètres de soudage (vitesse d'alimentation du fil, énergie fournie…).

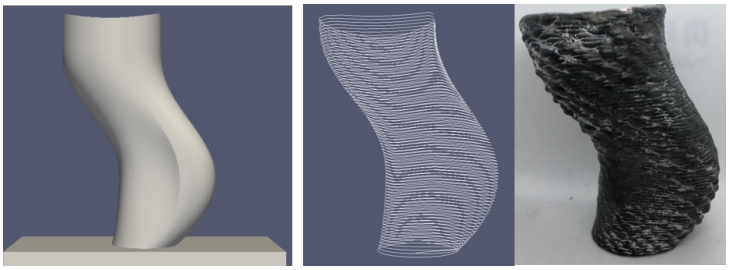

Figure 2 – Étapes de fabrication de pièces par la stratégie de génération continue.

4. Conclusion et perspectives

La mise en place d'une stratégie globale de génération de trajectoires sans interruption de l'arc électrique a été testée sur des pièces de révolution ayant, ou non, des extrémités planes. Cette stratégie a été validée expérimentalement. La prochaine étape, sur laquelle nous travaillons actuellement, est la mise en place d'une stratégie pour les pièces fermées. En effet pour les pièces fermées quelconques, une autre difficulté s'ajoute, c'est la détermination du point terminal de la construction. Pour déterminer ce point, les distances géodésiques entre des points finaux potentiels et les points à la base de la pièce seront utilisées. Cette stratégie est en cours de validation. Enfin, il est envisagé de coupler un modèle thermique à la génération de trajectoire pour tenir compte des effets thermiques lors de la fabrication et moduler la vitesse de dépôt le long de la trajectoire précédemment déterminée.

5. Références bibliographiques

[1] S.W. Williams. Wire +Arc Additive Manufacturing, *Materials Science and Technology*, 32:7, 641-647, 2016.

[2] D. Ding. Advanced Design for Additive Manufacturing: 3D Slicing and 2D Path Planning, *New Trends in 3D Printing*, pages 3–24, 2016.

Vers une synergie entre analyses de fiabilité par échantillonnage adaptatif et réduction de modèles

Doctorant : Morgane MENZ[1]
Encadrants : Christian GOGU[2], Jérôme Morio[3], Nathalie Bartoli[4], 5Sylvain.Dubreuil@onera.fr

[1] morgane.menz@univ-tlse3.fr
[2] christian.gogu@univ-tlse3.fr , [3] Jerome.Morio@onera.fr , [4] Nathalie.Bartoli@onera.fr, [5]Sylvain.Dubreuil@onera.fr

Résumé — Les approches d'apprentissage actif sont un moyen de fortement réduire les temps de calcul des analyses de fiabilité en diminuant le nombre d'appels au code de calcul. La réduction de modèles est une autre approche prometteuse pour diminuer les temps de calcul. Afin de réduire encore davantage le coût numérique de ces analyses, nous proposons un couplage entre ces deux approches. Plus précisément, nous avons mis en place une méthodologie adaptative permettant de choisir, par le biais d'un critère de couplage, si une solution réduite peut être utilisée à la place du modèle numérique complexe dans le cadre du calcul d'une probabilité de défaillance.

Abstract — Running a reliability analysis on engineering problems involving complex numerical models can be computationally very expensive. Hence advanced methods are required to reduce the number of calls to the expensive computer codes. Adaptive sampling based reliability analysis methods are one promising way to reduce the number of numerical model evaluations. Reduced order modelling is another one. In order to further reduce the numerical costs of Kriging based adaptive sampling approaches for calculating probabilities of failure, a method combining active learning approaches and reduced basis modeling has been developed using an efficient coupling criterion.

1. Contexte

Les problèmes d'analyse de fiabilité sur des systèmes ou structures complexes, de grandes dimensions physiques ou stochastiques, sont souvent numériquement coûteux à résoudre, ce qui en limite l'utilisation dans l'industrie. Le problème du coût numérique a été récemment abordé via deux fronts distincts.

D'une part, des développements récents dans le domaine des approches d'analyse de fiabilité par apprentissage actif ont permis des réductions importantes des temps de calcul pour des problèmes avec un nombre modéré de variables aléatoires. Les méthodes par apprentissage actif, connues aussi sous le nom de méthodes par échantillonnage adaptatif, consistent à construire un modèle de substitution (ou métamodèle) de la fonction de performance et enrichir de manière adaptative ce métamodèle.

D'autre part, l'utilisation de la réduction de modèles a également permis des gains importants en temps de calcul. Dans la thèse, on s'intéresse plus particulièrement à la réduction de modèles appelée « en base réduite » [1], qui consiste à rechercher une solution dans un sous-espace judicieusement construit, qui est de dimension notablement réduite par rapport à l'espace initial.

2. Démarche, déroulement et principaux résultats obtenus

Les algorithmes d'analyse de fiabilité par des méthodes d'apprentissage actif d'un métamodèle de Krigeage (ou régression par processus gaussien) [2] (par exemple la méthode AK-MCS [3])

permettent de déterminer à chaque itération, le meilleur candidat pour la prochaine simulation en utilisant uniquement la structure d'incertitude du Krigeage, puis de l'évaluer par le modèle numérique. Bien que réduisant significativement le nombre de simulations, ces algorithmes utilisent toutefois une évaluation du modèle numérique complet à chaque itération.

Cependant, il n'est pas toujours nécessaire d'évaluer l'ensemble des échantillons à l'aide du modèle numérique. En effet, de nombreux phénomènes physiques peuvent être décrits de manière très précise à l'aide de modes dominants pouvant être estimés à l'aide d'échantillons adjacents préalablement évalués. C'est l'idée de base des méthodes de réduction de modèles.

L'objet de la thèse est alors de développer une nouvelle méthode d'analyse de fiabilité basée sur différents niveaux de fidélité. Le concept de la méthode développée au cours de la thèse est de construire de manière adaptative un modèle réduit qui pourra être utilisé en certains points à la place du modèle numérique complet. Le verrou dans la mise en place du couplage des deux approches réside dans la définition d'un critère de couplage sur lequel se baser pour décider si la solution réduite est suffisante ou si la précision du modèle numérique complet est nécessaire.

Un critère simple et un critère plus avancé utilisant chacun des estimateurs d'erreur basés sur des résidus ont été proposés. Les résidus dépendent en effet du conditionnement de la matrice de rigidité et peuvent donner une estimation inexacte de l'erreur de la solution en base réduite dans certains cas. Ainsi l'utilisation d'un résidu préconditionné [4], homogène à la variable d'état, peut améliorer l'estimateur d'erreur basé sur des résidus et donc les performances du couplage.

Pour illustrer la nouvelle méthodologie proposée, nous l'avons appliquée au cas d'une plaque composite stratifiée de 12 plis trouée en flexion dont la défaillance est identifiée par le calcul du critère de Tsaï-Hill. Les 6 angles d'orientation des fibres et les 6 épaisseurs de chaque pli sont les variables incertaines du problème modélisées par des variables aléatoires (respectivement selon des lois uniformes et des lois Gamma). En moyenne sur ce problème, l'accélération obtenue en comparant la nouvelle méthode à la méthode AK-MCS classique est de l'ordre d'un facteur 6.7. L'algorithme de couplage fait appel au modèle numérique coûteux seulement pour 17.6 % des évaluations.

3. Perspectives

Comparé à l'utilisation de l'algorithme AK-MCS pour lequel le problème complet est résolu à chaque itération, la nouvelle méthode montre un fort potentiel de réduction du coût numérique. Sur les différentes applications étudiées, elle a permis d'obtenir une accélération jusqu'à un facteur 7 en réduisant le nombre d'appels au modèle numérique complet. Comme perspective notons qu'il serait intéressant d'appliquer cette méthode lors d'une optimisation sous contrainte de fiabilité étant donné les fortes réductions de coûts de calcul obtenues pour une seule analyse de fiabilité.

4. Références bibliographiques

Références

[1] Benner P., Gugercin S., Willcox K. (2015). A survey of projection-based model reduction methods for parametric dynamical systems. SIAM review, 57(4), 483-531.

[2] C. E. Rasmussen, C. K. I. Williams, Gaussian processes for machine learning, Adaptive computation and machine learning, MIT Press, Cambridge, Mass, 2006, oCLC : ocm61285753.

[3] Echard B., Gayton N., Lemaire M. (2011) AK-MCS: An active learning reliability method combining Kriging and Monte Carlo Simulation, Structural Safety, 33(2), 145-154P.

[4] O. Zahm, A. Nouy, Interpolation of inverse operators for preconditioning parameter-dependent equations, SIAM Journal on Scientific Computing 38 (2) (2016) A1044–A1074.

Etude de la migration inertielle de particules de forme complexe dans des micro-canaux

Doctorant : Tohme TOHME[1]
Encadrants : Lucien BALDAS[2], Pascale MAGAUD[3]

[1] *tohme.tohme@univ-tlse3.fr*
[2] *baldas@insa-toulouse.fr*, [3] *magaud@insa-toulouse.fr*

Résumé — De nombreux travaux ont démontré que la distribution spatiale de particules en écoulement dans des microcanaux pouvait devenir hétérogène même dans des configurations d'écoulements très simples. Des sphères en suspension iso-dense, par exemple, migrent sous certaines conditions vers des positions d'équilibre préférentielles. L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de la forme de la particule sur sa migration dans le canal et de concevoir un séparateur basé sur la forme de la particule.

Abstract — It is now well known that the distribution of particles flowing in a micro-channel can become inhomogeneous even in very simple flow and geometrical configurations. For example, non-buoyant spheres flowing in micro-channels under specific flow conditions migrate towards equilibrium positions located near the channel walls. The objective of this work is to study the effect of the particle shape on its migration in the channel and to design a shape-based separator.

1. Introduction

La séparation, la détection, la concentration, le tri et/ou l'orientation de particules au sein d'une suspension sont des processus utilisés dans de nombreux domaines tels que l'agriculture, la biomédecine, l'environnement, ou encore les industries alimentaire et pharmaceutique. Cependant, les technologies conventionnelles de séparation/tri (i.e. décantation, centrifugation, filtration membranaire) coûtent cher et nécessitent des volumes de suspension importants. La dernière décennie a vu se développer différent procédés de séparation de particules à micro-échelle utilisant des micro-écoulements. Ces microsystèmes présentent de nombreux avantages : ils sont compactes donc transportables et permettent de travailler avec des volumes réduits de suspension.
L'objectif à long terme du projet sur lequel nous travaillons est de développer un micro-séparateur utilisant uniquement la migration inertielle naturelle des particules en écoulement dans des micro-canaux. Il a été en effet démontré que, dans des conditions d'écoulement et de géométrie de canal spécifiques, les particules en écoulement migrent latéralement vers des positions d'équilibre où elles se concentrent [3] (Figure 1).

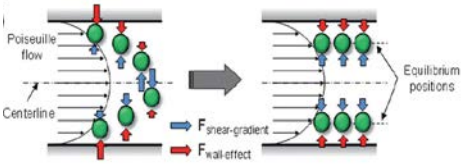

Figure 1 – Les forces inertielles à l'origine de la migration des particules vers leurs positions d'équilibre [5].

La grande majorité des travaux théoriques, numériques et expérimentaux trouvés dans la littérature sur la focalisation inertielle se concentrent sur la migration des particules sphériques puisque les sphères sont des objets faciles à modéliser mathématiquement et numériquement qui se mettent en œuvre de surcroit aisément expérimentalement. Pourtant dans la majorité des applications précitées, les particules en suspension sont non sphériques. L'objectif de ce travail de thèse est donc d'étudier la

migration inertielle de particules anisotropes en écoulement dans des micro-canaux afin de comprendre l'effet de la forme de la particule sur sa migration. Les résultats obtenus permettront de concevoir et de fabriquer un premier prototype de séparateur/trieur basé sur la forme de la particule.

2. Avancement

La première moitié de la thèse s'est organisée en trois grandes parties. **(i) Dans un premier temps, une étude bibliographique** a permis la rédaction d'un article de revue sur la migration inertielle de particules non-sphériques dans des micro-canaux qui sera prochainement soumis. **(ii)** Dans un deuxième temps, **un banc d'essais** a été conçu puis développé. Ce banc est constitué d'un rail sur lequel trois platines permettant le déplacement tri-dimensionnel d'une source lumineuse et d'un micro-canal et d'un ensemble camera/ objectif. L'écoulement de la suspension est généré par une pompe à seringue reliée au canal (Figure 2). Des séries d'images sont prises par la caméra à différentes profondeurs du canal et positions longitudinales. **(iii)** Enfin **un code de traitement d'images** a été développé sur MATLAB pour identifier sur chacune des images la position des particules dans le plan de visualisation et déterminer si celles-ci sont dans ou hors du plan focal de l'objectif. Le dispositif développé permet donc d'obtenir la distribution 3D des particules le long du micro-canal et donc d'analyser statistiquement leur migration latérale.

Figure 2 – Le banc d'essais conçu et développé

3. Perspectives

Les objectifs de la deuxième moitié de thèse sont **(i)** de valider dans un premier temps le banc d'essais, de réaliser des campagnes de mesures en faisant varier les paramètres tels que la forme ou la taille des particules, la vitesse de l'écoulement, ou encore la concentration en particules de la suspension, et de les analyser **(ii)** Il s'agira ensuite d'améliorer le code de traitement d'images pour identifier l'orientation des particules au sein du micro-canal. **(iii)** Les configurations d'écoulement les plus intéressantes seront ensuite simulées numériquement à l'aide du code de calcul FCM développé par nos partenaires du Laboratoire de Génie Chimique afin de comprendre les mécanismes mis en jeu dans le phénomène de migration.**(iv)** Enfin les résultats obtenus permettront de concevoir, fabriquer et tester un prototype de séparateur/trieur basé sur la forme des particules.

Références

[1] Gossett, D. R., Weaver, W. M., Mach, A. J., Hur, S. C., Tse, H. T. K., Lee, W., Amini, H., and Di Carlo, D.. Label-free cell separation and sorting in microuidic systems, *Analytical and bioanalytical chemistry*, 397(8):3249-3267, 2010.

[2] Lee G-B, Chang C-C, Huang S-B, Yang R-J. The hydrodynamic focusing effect inside rectangular microchannels, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16:1024-1032, 2006.

[3] Matas J-P, Morris JF, Guazzelli É. Inertial migration of rigid spherical particles in Poiseuille flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 515:171-195, 2004.

[4] Pamme N. Continuous flow separations in microfluidic devices, *Lab Chip*, 7:1644-1659, 2007.

[5] Park JS., Song SH., Jung HI. Continuous focusing of microparticles using inertial lift force and vorticity via multi-orifice microfluidic channels, *Lab Chip*, 9, 939-948, 2009.

Développement de modèles des systèmes de commande vol des hélicoptères pour le diagnostic de faute et la surveillance

Doctorant : Geneviève MKADARA[1]
Encadrants : Jean-Charles MARE[2], Gregor PAULMANN[3]

[1] *mkadara@insa-toulouse.fr*
[2] *mare@insa-toulouse.fr*, [3]*gregor.paulmann@airbus.com*

Résumé — La surveillance des équipements pour la sécurité et la réduction des coûts de maintenance est d'importance croissante dans l'aéronautique. Pour les hélicoptères, les pompes hydrauliques principales sont cruciales car elles transmettent de la puissance permettant la manœuvrabilité des appareils. Une approche de surveillance pour ces pompes est définie. Un modèle de pompe à pistons axiaux est développé et validé pour servir à l'évaluation de cette approche.

Abstract — The monitoring of equipment for safety and the reduction of maintenance costs is of increasing importance in the aeronautics industry. For helicopters, the main hydraulic pumps are crucial because they transmit power that allows the aircraft to be operated. A monitoring approach for these pumps is defined. An axial piston pump model is developed and validated to be used to evaluate this approach.

1. Contexte

Le design d'un aéronef est contraint par des exigences fortes de maniabilité et de sécurité. Dans ce contexte de recherche de l'hélicoptère plus sûr, plus léger, et de concurrence forte se pose la question de l'optimisation de la maintenance. Des efforts sont faits dans cette direction depuis plusieurs années : de nombreux systèmes sont implémentés sur les appareils pour observer le vieillissement des équipements et beaucoup de données sont surveillées et stockées durant les vols. Les systèmes d'actionnement hydraulique, critiques à la sécurité car certains d'entre eux permettent la maniabilité de l'hélicoptère, font partie des systèmes surveillés. Les pompes hydrauliques, fournissant du fluide sous pression au système hydraulique, et leur surveillance pour une maintenance « à l'état » sont le sujet de la thèse. Beaucoup d'études ont été réalisées sur le *health monitoring* des pompes mais rarement pour des applications mobiles, et les études n'ont généralement pas dépassé le stade du banc d'essai [3, 5]. Dans le cas de cette thèse, le but de l'étude est d'évaluer une approche de surveillance bas coût pour les pompes hydrauliques principales des hélicoptères, via une mesure de la pression au port de drain de la pompe. La thèse est financée via un contrat CIFRE avec Airbus Helicopters.

2. Synthèse

2.1. Modélisation

Une importante partie de la thèse est focalisée sur la création d'un modèle de pompe hydraulique ('pompe virtuelle') permettant l'évaluation de l'approche de surveillance définie. Pour cela, un modèle axé hydraulique et fuites est implémenté. Les fuites prises en compte sont les suivantes : piston/barillet, patin/plateau, barillet/glace de distribution, piston de compensation/corps, piston de course/corps, distributeur. Une attention toute particulière est donnée aux fuites patin/plateau et barillet/glace de distribution. En effet, l'enjeu est de créer un modèle à paramètres localisés (1D) détaillé qui permette d'introduire des fuites à travers des jeux de hauteur variable. Dans la plupart des cas, la modélisation des fuites des pompes hydrauliques est faite pour des jeux de hauteur fixe, comme

par exemple dans [2, 4]. D'autres auteurs ont tiré de la CFD des modèles analytiques pour exprimer la fuite de manière plus réaliste, bien que toujours pour un jeu constant [1].

2.2. Validation du modèle

Deux campagnes d'essais ont été spécifiées par nous et réalisées par un partenaire industriel. Ces essais serviront à vérifier et valider le modèle de pompe, ainsi qu'à mesurer à haute fréquence la pression au port de drain de la pompe. En 2018 des essais statiques ont été réalisés pour différentes vitesses de rotation, de température et de pression d'aspiration, dans le but d'en étudier l'influence sur la fuite et la pression au port de drain. Des essais dynamiques (contre plusieurs températures) ont eu lieu en Janvier 2019. Des essais complémentaires auront lieu avant l'été 2019.

3. Perspectives

Le temps restant de la thèse sera séparé entre à l'achèvement du modèle de pompe commencé et sa validation, et l'évaluation de l'approche de surveillance définie. Cette évaluation sera basée sur le modèle validé. Dans le cas où l'approche définie ne donnerait pas satisfaction, le modèle sera utilisé pour définir une nouvelle approche de surveillance (voir Figure 1).

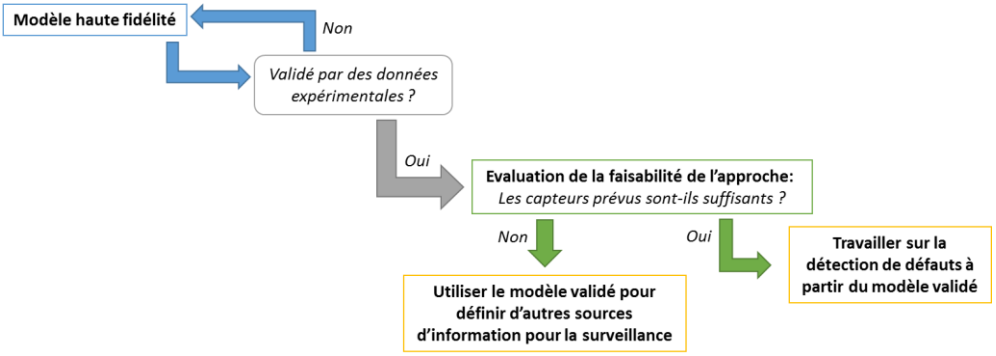

Figure 1 – Schéma du flux de travail

4. Références bibliographiques

[1] J. M. Bergada, J. Watton, S. Kumar. Pressure, Flow, Force and Torque Between the Barrel and the Port Plate in an Axial Piston Pump, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 130, Pag.011011-1-16, 2008.

[2] J. Ivantysyn, M. Ivantysynova. *Hydrostatic Pumps and Motors: Principles, Design, Performance, Modelling, Analysis, Control and Testing*, Tech Books International, 2003.

[3] J. G. Maradey Lázaro, C. Borrás Pinilla and S. Roa Prada. *A survey of approaches for fault diagnosis in axial piston pumps*, International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE), Phoenix, Arizona, USA, November 11-17, 2016.

[4] S. Mancò, N. Nervegna, A. Lettini and L. Gilardino. *Advances in the simulation of axial piston pumps*, Fifth JFPS International Symposium, Nara, Japan, November 2002.

[5] T. Torikka. *Evaluation of Analysis Methods for Fault Diagnosis on Axial Piston Pumps*, Scandinavian International Conference on Fluid Power (SICFP), Tampere, Finland, May 18-20, 2011.

Etude de l'état de contrainte en bord de trou dans les structures aéronautiques suite au procédé de perçage

Doctorant : Alexandra LACOMBE[1]
Encadrants : Yann LANDON[2], Manuel PAREDES[3], Clément CHIROL[4], Audrey BENABEN[5]

[1] *alexandra.lacombe1@univ-tlse3.fr*
[2] *yann.landon@univ-tlse3.fr*, [3]*paredes@insa-toulouse.fr*, [4]*clement.chirol@airbus.com*, [5]*audrey.benaben@airbus.com*

Résumé — La thèse vise à étudier l'influence du procédé de perçage sur la tenue en fatigue des pièces percées en alliage d'aluminium 2024-T351 ainsi qu'à identifier et comprendre les phénomènes pilotant la durée de vie en fatigue. Pour comparer la performance en fatigue d'éprouvettes percées axialement et orbitalement, des premiers essais, menés au diamètre de perçage 6,35mm, n'ont montré aucune influence du procédé de perçage sur la tenue en fatigue. Afin de pouvoir étudier le lien entre intégrité de surface et tenue en fatigue, de nouveaux essais seront réalisés pour une configuration avec un potentiel écart de tenue en fatigue entre les deux procédés de perçage.

Abstract — The aim of the thesis is to study the impact of the drilling process on the fatigue strength of 2024-T351 aluminium alloy drilled parts and to identify and understand the phenomena which control the fatigue life. To compare the fatigue performance of axially and orbitally drilled specimens, initial tests, conducted for a 6.35mm drilling diameter, showed no influence of the drilling process on fatigue strength. In order to study the link between surface integrity and fatigue strength, new tests will be carried out for a configuration with a potential difference in fatigue strength between the two drilling processes.

1. Introduction

Dans les structures aéronautiques, les trous percés constituent des zones critiques majeures à partir desquelles des endommagements peuvent s'initier en fatigue. Les industriels constatent des différences significatives en termes de tenue en fatigue des structures percées en fonction des paramètres et des procédés de perçage employés [1]. Certains auteurs associent l'augmentation de la durée de vie en fatigue à l'augmentation des contraintes résiduelles compressives en bord de trou [1] alors que d'autres l'associent plutôt à des aspects métallurgiques [2]. L'objectif des travaux de thèse est de comprendre et d'identifier les phénomènes qui pilotent la durée de vie en fatigue des pièces percées en alliage d'aluminium 2024-T351 afin de permettre aux industriels d'optimiser la tenue en fatigue des assemblages aéronautiques. L'influence du procédé de perçage (axial : avance rectiligne d'un foret ou orbital : avance hélicoïdale d'une fraise) sur la tenue en fatigue est particulièrement étudiée.

2. Etude expérimentale

Une première campagne d'essais a été menée afin de comparer le comportement en fatigue d'éprouvettes en alliage d'aluminium 2024-T351 percées axialement et orbitalement. Les éprouvettes étudiées sont de forme rectangulaire (19,05mm x 200mm) et deux épaisseurs d'éprouvettes sont étudiées (3,175mm et 6,35mm). Les éprouvettes sont percées en leur centre au diamètre 6,35mm avec l'utilisation d'une micro-lubrification externe. Le perçage axial est réalisé avec un foret hélicoïdal monobloc en carbure de tungstène à 2 lèvres (N=9000tr/mn ; V_f=900mm/mn). Le perçage orbital est réalisé avec une fraise orbitale à 4 dents en carbure de tungstène non revêtu de diamètre 4,8mm (N=40000tr/mn ; N_{orb}=1500tr/mn et V_{fa}=60mm/mn ; usinage en opposition). Les essais de fatigue sont effectués à différents niveaux de charge pour une fréquence de 20Hz et un rapport de charge de 0,1.

Les résultats obtenus montrent une influence négligeable du procédé de perçage sur la tenue en fatigue dans le cas du diamètre de perçage 6,35mm (Figure 1).

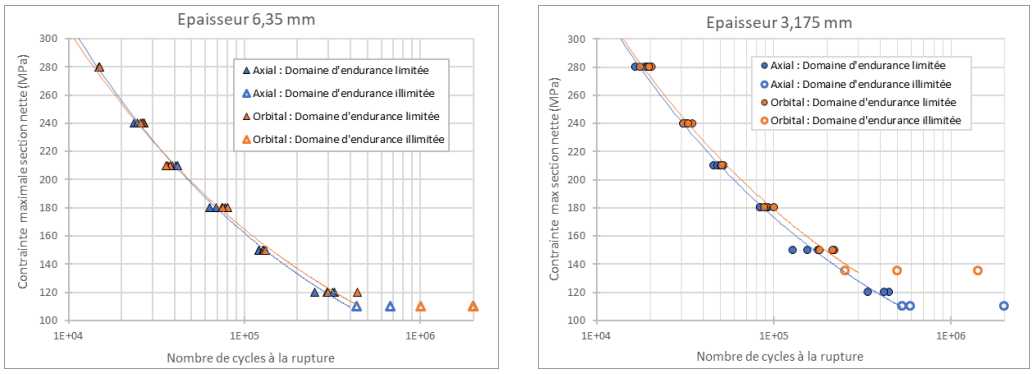

Figure 1 – Comparaison du comportement en fatigue des éprouvettes percées axialement et orbitalement

En parallèle de ces essais, un protocole a été mis en place pour caractériser l'intégrité de surface des trous percés (état de surface, microstructure, dureté). Cependant, les résultats d'essais de fatigue ne montrant aucune différence sur la tenue en fatigue entre les 2 procédés de perçage, les résultats concernant l'intégrité de surface des trous ne sont pour l'instant pas pertinents. C'est pourquoi, une seconde campagne d'essais de fatigue sera menée pour une configuration avec une potentielle différence de tenue en fatigue entre les deux procédés de perçage (diamètre de perçage 9,52mm).

3. Etude numérique

Les contraintes résiduelles générées en bord de trou au cours de l'usinage étant, d'après l'étude bibliographique, un potentiel facteur influant sur la tenue en fatigue, des essais expérimentaux ont été menés afin de tenter de caractériser l'état de contrainte en bord de trou. Néanmoins, les résultats de ces essais n'étant pas concluants, un modèle éléments finis est développé sous Abaqus afin de prédire l'état de contrainte généré en bord de trou au cours du perçage. Afin de s'affranchir de la modélisation de l'enlèvement de matière, lourde en temps de calcul, la stratégie de simulation consiste à appliquer un chargement thermomécanique équivalent mobile directement sur la pièce finie. Ce chargement est identifié à partir de données expérimentales (températures ; efforts et couple de perçage). Une loi de Johnson-Cook est utilisée pour décrire au mieux le comportement du matériau au cours de l'usinage.

3. Conclusions et perspectives

La campagne d'essais de fatigue menée ne montre, avec des résultats très répétables, aucune influence du procédé de perçage sur la tenue en fatigue pour le diamètre 6,35mm. Une seconde campagne d'essais sera menée pour une configuration avec un potentiel écart de tenue en fatigue entre les procédés de perçage (diamètre de perçage 9,52mm) afin de pouvoir étudier le lien entre intégrité de surface et tenue en fatigue. Concernant l'influence du procédé de perçage sur l'état de contrainte de la pièce percée, ce dernier étant complexe à évaluer expérimentalement dans le cas du matériau étudié, elle sera étudiée numériquement.

Références

[1] L. Deitert. Orbital Drilling, *SAE International*, 18 Octobre, 2011.

[2] D. Sun, P. Lemoine, D. Keys, P. Doyle, S. Malinov, Q. Zhao, X. Qin, Y. Jin. Hole-making processes and their impacts on the microstructure and fatigue response of aircraft alloys, *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 94, Issue 5-8, Pag.1719-1726, 2018

Influence des conditions de mise en solution sur le compromis résistance mécanique-ténacité de l'acier maraging inoxydable MLX19 pour application train d'atterrissage.

Doctorante : Stella ANCEY-ROCCHI[1]
Encadrants : Denis DELAGNES[2], Vanessa VIDAL[3]
Encadrants industriels : Denis BECHET et Thibault POULAIN *(Aubert & Duval)*, Nicolas BINOT et Thomas BILLOT *(Safran Landing Systems)*

[1] *stella.ancey@mines-albi.fr*
[2] *denis.delagnes@mines-albi.fr*, [3] *vanessa.vidal@mines-albi.fr*

Résumé — L'acier MLX19 est un acier maraging inoxydable durci au cours du revenu par la précipitation des phases intermétalliques $NiAl$ et $Ni_3(Ti, Al)$. Cet acier est un candidat pour une application trains d'atterrissage, pour laquelle il est nécessaire d'avoir un bon compromis entre une résistance mécanique élevée et une bonne ténacité. Ces deux propriétés dépendent essentiellement de l'étape d'austénitisation/mise en solution. Le principal but de ce travail est de déterminer l'influence des paramètres de mise en solution (vitesses de chauffage et de refroidissement, temps et température de maintien) sur la microstructure et les propriétés mécaniques finales.

Abstract — MLX19 steel is a stainless maraging steel hardened during ageing by the precipitation of intermetallic phases $NiAl$ and $Ni_3(Ti, Al)$. This steel is a candidate for landing gear applications, where a compromise between a high mechanical resistance (UTS) and a good toughness is required. Both properties are essentially depending on the austenitization/dissolution stage. The main goal of this work is to determine the influence of austenitization parameters (heating and cooling rates, holding time and temperature) on the final microstructure and mechanical properties.

1. Contexte, problématique et objectifs de la thèse

1.1. Contexte et problématique

Les aciers maraging (contraction des termes *martensite* et *ageing* en anglais) répondent aux critères actuels requis par les applications aéronautiques nécessitant de hautes performances. Ce sont des aciers très riches en éléments d'alliages et à très faible teneur en carbone, durcis par la précipitation de phases intermétalliques au cours de l'étape de revenu. La nuance MLX19 est un acier maraging inoxydable élaboré par Aubert & Duval. Cet acier (système Fe-Ni-Cr-Mo-Al-Ti) est durci par les phases intermétalliques $NiAl$ et $Ni_3(Ti, Al)$, ce qui lui confère une bonne résistance. Ces travaux de thèse ont d'abord pour but de mettre en évidence et de comprendre les mécanismes microstructuraux associés à des limites constatées en ténacité et dans un deuxième temps de proposer un traitement thermique alternatif ayant pour objectif d'améliorer le compromis de propriétés résistance mécanique-ténacité.

Au cours du traitement thermique standard de l'acier, différentes phases sont présentes : la matrice martensitique (dizaine de microns), l'austénite résiduelle subsistant après trempe depuis la mise en solution (quelques microns), et enfin l'austénite de réversion (micron) et les deux populations de précipités nanométriques (<10 nm) formés au cours de l'étape de revenu. Cinq phases sont donc en coexistence après revenu et de très fines échelles sont mises en jeu. L'établissement du lien entre microstructure et propriétés mécaniques finales constitue donc un véritable défi expérimental.

1.2. Objectifs de la thèse et organisation de la campagne d'essais

L'objectif est de faire le lien entre le traitement thermique, la microstructure résultante et les conséquences sur les propriétés mécaniques, en gardant toujours à l'esprit que chaque paramètre (forme, taille,…) de chacune des cinq phases en présence peut modifier/dégrader le compromis de propriétés.

De nombreuses techniques expérimentales, permettant la caractérisation multi-échelles de la microstructure, ont déjà été mises en œuvre. La dilatométrie (ICA-A) permet l'étude des transformations de phase au chauffage et au refroidissement. La diffraction des rayons X et la dureté (ICA-A) permettent respectivement la quantification de la phase austénitique (ductilité) et la mesure de dureté (résistance). Les observations MEB (ICA-A) ou MET (Plateforme Castaing de Toulouse) permettent essentiellement l'observation fine de la matrice (martensite et austénite) et des précipités. Enfin, les essais de Diffusion de Neutrons aux Petits Angles (DNPA) (CEA Saclay) fournissent des informations complémentaires sur la fraction volumique et la taille des particules nanométriques (<20 nm) après revenu.

2. Résultats obtenus à mi-parcours

Deux températures de mise en solution *(T)* ont principalement été étudiées : 850°C et 950°C. Pour ces deux températures, différentes vitesses de chauffage *(Vch)* et différents temps de maintien *(t)* ont été choisis. Les propriétés sont étudiées après trempe depuis la mise en solution et après revenu.

La mise en solution à 850°C conduit à une forte variabilité des propriétés en fonction de *(Vch, t)*, tandis qu'elles sont stabilisées à 950°C, pour tous les paramètres *(Vch, t)* choisis.

Après des chauffages lents et des maintiens courts à 850°C, la microstructure après trempe est composée de nombreux précipités non-dissous (riches en éléments d'alliages notamment le Ni) et d'une quantité importante d'austénite résiduelle. D'après la dilatométrie, la vitesse lente au chauffage favorise la stabilisation de la précipitation et le temps de maintien court ne permet ni d'amorcer leur dissolution ni de débuter une homogénéisation de l'austénite. La présence de précipités non-dissous après trempe (contenant une grande quantité d'éléments d'alliages) a pour effet de réduire le potentiel de précipitation nanométrique au revenu, conduisant ainsi à une baisse de dureté finale. De plus, la forte présence d'austénite (ductile) accentue cette baisse de résistance mais améliore la ténacité. Ainsi, à 850°C, le choix combiné d'une vitesse de chauffage rapide et d'un temps de maintien long conduit respectivement à une disparition quasi-totale des précipités non-dissous et à de faibles quantités d'austénite résiduelle, optimisant la résistance finale (dureté élevée) sans trop baisser la ductilité (présence d'austénite).

Après des chauffages à 950°C pour tous les paramètres testés, aucun précipité n'est observé après trempe et le taux d'austénite résiduelle est faible. Cela est cohérent avec un phénomène de dissolution mis en évidence vers 875-900°C. Les propriétés sont donc stabilisées et, après revenu, le durcissement nanométrique est optimal, avec un taux d'austénite total permettant quand même d'assurer de la ductilité. La structure étant plus grossière, on observe cependant une légère baisse de dureté.

Ainsi, pour conserver une résistance importante sans trop dégrader la ductilité, il est nécessaire de choisir un traitement assurant la dissolution de toutes les phases à la mise en solution, mais permettant de conserver un taux d'austénite minimal pour ne pas trop dégrader la ductilité.

3. Perspectives

Une étude mécanique (traction) est prévue, afin d'accéder aux valeurs de résistance et de ductilité. Une mesure précise de la taille de grains ainsi qu'une étude fine des mécanismes mis en jeu au cours du traitement (chauffage et refroidissement) sont également prévues (modèle cinétique).

De nouveaux essais de DNPA sont prévus en Juin 2019 (CEA Saclay). Des essais de Diffraction de Neutrons *in-situ* sont également prévus en Juillet 2019 (ILL Grenoble) pour une étude des transformations de phase au chauffage. Enfin, des essais de Sonde Atomique Tomographique (IRMA, GPM, Rouen) permettront d'identifier les précipités non-dissous après trempe et les précipités durcissants après revenu ainsi que d'étudier les éventuelles hétérogénéités de composition de la matrice.

Un oral dans la conférence internationale Euromat 2019 (1-5 Septembre) est également confirmé, dans le colloque *Advanced Steels*. La rédaction d'une publication est également prévue.

4. Références bibliographiques

[1] C. Le Nué, J.M. Cloué, M.H. Mathon, S. Puech, D. Béchet et D. Delagnes. Relationship between the yield strength-fracture toughness balance and the multiscale microstructure of a maraging stainless steel for aicraft applications, *Materials Science Forum*, 879, 413-418, 2017.

[2] R. Schnitzer, R. Radis, M. Nöhrer, M. Schober, R. Hochfellner, S. Zinner, E. Povoden-Karadeniz, E. Kozeschnik et H. Leitner. Reverted austenite in PH 13-8 Mo maraging steels, *Materials Chemistry and Physics*, 122, 138-145, 2010.

[3] U. K. Viswanathan, T. R. G. Kutty et C. Ganguly. Dilatometric technique for evaluation of the kinetics of solid-state transformation of maraging steel, *Metallurgical Transactions A*, 24, 2653-2656, 1993.

Étude des mécanismes de plasticité à chaud d'un alliage de titane: approche métallurgique de la formabilité

Doctorante : Laurie DESPAX[1]
Encadrants : Denis DELAGNES[2], Vanessa VIDAL[3], Moukrane DEHMAS[4].

[1] laurie.despax@*mines-albi.fr*
[2] *denis.delagnes@mines-albi.fr*, [3] *vanessa.vidal@mines-albi.fr*, [4] *moukrane.dehmas@ensiacet.fr*.

Résumé — Les enjeux de cette thèse sont la compréhension des micro-mécanismes de déformation mis en jeu, dans l'alliage de titane Ti-6Al-4V, lors d'une sollicitation mécanique à haute température par l'étude du rôle de chaque phase dans la déformation. Les techniques de caractérisation utilisées sont la Diffraction de Rayons X, la Microscopie Electronique à Balayage combinée à de la Diffraction d'Electrons Rétrodiffusés et des grands instruments (neutrons, synchrotron). Les évolutions de pourcentage, de morphologie et d'orientation des grains α et β seront déterminés lors de déformations plastiques à hautes températures sur deux microstructures initiales.

Abstract — These thesis issues are the understanding of the micro-mechanisms of deformation involved, in the titanium alloy Ti-6Al-4V, during tensile test at high temperature by the study of the role of each phase in the deformation. The different techniques used are the X-Ray Diffraction, the Scanning Electron Microscope combined to Electron Backscatter Diffraction and major research tools (neutron source, synchrotron radiation). The fraction, the shape as well as the crystallographic orientation of the grains α and β will be studied during plastic deformation at high temperatures on two initial microstructures.

1. Contexte et Problématique

Le contexte de cette thèse est la mise en forme à chaud d'alliages de titane (dont le formage superplastique). Le formage à chaud est un procédé très couteux de par les hautes températures (T≥900°C) ainsi que les faibles vitesses de déformation ($\dot{\varepsilon} \leq 10^{-3}$ s^{-1}) qu'il nécessite. Par conséquent, de nombreuses études traitent de la diminution de la température et du temps de mise en forme en optimisant la microstructure initiale. L'alliage Ti-6Al-4V étudié est bi-phasé α+β. Selon la microstructure initiale choisie [2] (taille de grain, forme de grain) et les conditions d'essai (température, vitesse de déformation), les mécanismes de déformation mis en jeu pour cet alliage sont différents. En effet, selon la taille de grain les températures de mise en forme seront plus ou moins hautes, or la proportion de phase α/β évolue en fonction de la température. Les phases ne vont donc pas avoir le même rôle dans la déformation selon leur morphologie initiale et selon la température. De nombreux mécanismes sont reportés dans la littérature [1] ainsi que des changements microstructuraux (recristallisation dynamique, grossissement et rotation des grains α). Cependant la majorité des publications existantes traitent des mécanismes induits par la phase α [3] et peu d'entre elles comparent ceux mis en jeu pour des tailles de grains différentes [2].

2. Objectifs et Démarche

L'objectif de cette étude est de comprendre les mécanismes microstructuraux qui interviennent sous différentes conditions de sollicitation, c'est-à-dire pour une gamme de températures allant de 700°C à 920°C et de vitesses de déformation de $\dot{\varepsilon}$ =10^{-2} s^{-1} à 10^{-4} s^{-1}, et pour deux tailles de grains α (0,5 µm et de 3 µm). Pour cela, plusieurs techniques sont utilisées : des **essais de traction interrompus** sur la microstructure de 3 µm à 3 températures (750, 870, 920°C) et sur celle de 0,5 µm, à 2 températures

(650°C, 750°C) pour caractériser le comportement mécanique sous différentes conditions et évaluer, à la fois l'énergie d'activation Q ainsi que le paramètre de sensibilité de la contrainte à la vitesse de déformation m ; des **essais de relaxation** sur la microstructure de 3 µm afin de mettre en place une loi physique permettant d'estimer les mécanismes impliqués dans la déformation ; la caractérisation des éprouvettes de traction **post-mortem** issues du 3 µm et 0,5 µm par Microscope Optique et Microscope Electronique à Balayage (MEB) combinés à de l'analyse d'image afin d'évaluer la proportion de phase et la taille des grains α et par EBSD (Diffraction d'électrons rétrodiffusés) afin de caractériser l'orientation cristallographique des grains, l'angle de désorientation entre les grains α ainsi que la localisation potentielle de dislocations ; des **essais « in-situ »** avec de grands instruments (neutrons, synchrotron) afin de s'affranchir des problèmes dus au refroidissement.

3. Résultats

La caractérisation de la microstructure initiale de 3 µm et de 0,5 µm a permis de mettre en évidence un léger allongement des grains selon la direction de laminage et également une texture cristallographique. Les essais de traction sur la microstructure de 0,5 µm, les essais de relaxation sur le 3 µm ainsi que la caractérisation par EBSD ont fait l'objet d'un déplacement dans le laboratoire partenaire de l'**université de Kagawa** (Japon). La caractérisation microstructurale et du comportement mécanique a été, pour le moment, concentrée sur la microstructure de 3 µm. Suite aux essais de traction interrompus, les courbes de contrainte-déformation démontrent une influence importante des conditions de sollicitation sur le comportement mécanique. À 750°C, en fonction de la vitesse de déformation, la déformation serait contrôlée par le mouvement de dislocations et/ou la recristallisation dynamique. Pour une vitesse de déformation rapide, à 870°C et 920°C, la déformation pourrait faire intervenir du glissement aux joints de grains (GBS) conduisant soit à la recristallisation dynamique marquée par un adoucissement de la contrainte soit à un petit durcissement, certainement dû au léger grossissement des grains mesuré. À 870°C et à 920°C pour de faibles vitesses de déformation, un fort durcissement du matériau est observé qui pourrait être expliqué en partie par un fort grossissement des grains α combiné à un mécanisme complémentaire, certainement contrôlé par la phase β car sa proportion est importante à haute température. La mise en relation des données extraites permet de mettre en évidence qu'au cours de la déformation, pour toutes les conditions de sollicitations, une combinaison de plusieurs mécanismes de déformation pourrait être mise en jeu.

4. Conclusion et perspectives

Suite à cette première gamme de caractérisation, un approfondissement dans le traitement des données reste à faire et d'autres méthodes sont nécessaires afin d'améliorer la compréhension du rôle de la phase β dans la déformation. La caractérisation du 0,5 µm après essai reste également à faire. L'état d'avancement actuel sera valorisé par la participation à la conférence internationale Titanium 2019 et devrait faire l'objet de la rédaction d'une publication. Les prochaines techniques de caractérisation envisagées sont la diffraction de neutron à la plateforme ISIS (en température et sous sollicitation mécanique) ainsi que d'autres essais de traction interrompus (observation mouvement des grains α en surface à différents stades de déformation. Une demande de temps de rayonnement synchrotron est en cours auprès de la plateforme PETRA III afin de caractériser in-situ l'évolution des phases α et β.

5. Références bibliographiques

[1] E. Alabort et al., On the mechanisms of superplasticity in Ti–6Al–4V, *Acta Materialia* (2016).

[2] J.S.Kim et al., Microstructural analysis on boundary sliding and its accommodation mode during superplastic deformation of Ti–6Al–4V alloy, *Materials Science and Engineering: A* (1999).

[3] Z. X. Zhang et al., Hot deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy, *Journal of Alloys and Compounds* (2017).

Etude des relations entre paramètres de soudage et usure des outillages du procédé FSW sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'une soudure Aluminium-Titane

Doctorante : Morgane GEYER[1]
Encadrantes : Christine BOHER[2] et Vanessa VIDAL[3]

[1] *morgane.geyer@mines-albi.fr*
[2] *christine.boher@mines-albi.fr*, [3] *vanessa.vidal@mines-albi.fr*

Résumé — En vue de développer un transport aérien durable, l'allègement des avions se révèle incontournable. La conception de structures multi-matériaux constitue aujourd'hui un axe de recherche majeur qui se heurte aux difficultés pour souder des matériaux aux propriétés physiques différentes. Le soudage par friction malaxage (FSW) constitue un procédé prometteur en raison de sa particularité à réaliser des soudures à l'état solide. L'étude des relations procédé/microstructure/propriétés mécaniques est menée sur des soudures Al2024-T3/ Ti-6Al-4V dans le but d'identifier les paramètres du procédé FSW optimisés.

Abstract — In order to develop a sustainable air transport, the airplane weight reduction is essential. Different approaches allow to fulfill this requirement. One of the technics consists of designing multi-materials structures but the issue is about welding materials with different physical properties. The friction stir welding process (FSW) is a promising solution because it is a solid-state joining process. The study of the relationship between the welding process, the microstructure and the mechanical properties is carried out on Al2024-T3/ Ti-6Al-4V welds in order to identify the optimized parameters.

1. Contexte et objectifs de la thèse

Le soudage par friction malaxage (FSW) constitue un procédé d'assemblage prometteur pour la réalisation de structures multi-matériaux [2]. A la différence des procédés de soudage classiques, les soudures sont obtenues à l'état solide permettant ainsi de s'affranchir des défauts inhérents à la transition d'état liquide → solide généralement à l'origine du manque de cohésion des joints soudés.

Les travaux de thèse se focalisent sur l'étude de soudures entre l'alliage d'aluminium Al2024-T3 et l'alliage de titane Ti-6Al-4V réalisées dans une configuration dite en recouvrement, schématisée en figure 1a. Les soudures FSW sont obtenues par l'intermédiaire d'un outil dont le rôle consiste d'une part à provoquer un échauffement de la matière et d'autre part à mélanger les matériaux via une importante déformation plastique [1]. Il en résulte un flux de matière au niveau de l'interface caractérisé par la formation de remontées de Ti-6Al-4V de part et d'autre de l'outil, appelées crochets et visibles en figure 1b. A une échelle plus fine, des évolutions microstructurales sont également observées au sein des tôles d'Al2024-T3 et de Ti-6Al-4V, ainsi qu'au niveau de l'interface.

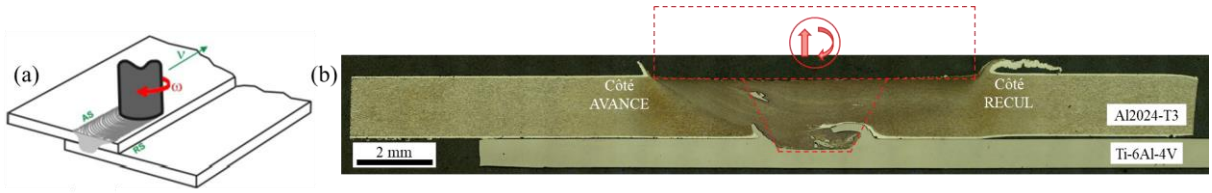

Figure 1 – (a) Schéma du principe du soudage FSW dans une configuration en recouvrement et (b) coupe transversale d'une soudure FSW entre les alliages Al2024-T3 et Ti-6Al-4V.

Ces évolutions macro et microscopiques contribuent à la résistance mécanique de l'assemblage. Suivant les paramètres procédé employés (vitesse d'avance, vitesse de rotation, force appliquée, …) les flux de chaleur et de matière ainsi que les modifications microstructurales qui en résultent varient conduisant à une évolution des propriétés mécaniques.

Par conséquent, la compréhension de l'influence des paramètres sur le flux de chaleur, le flux de matière à l'interface, les évolutions microstructurales et les propriétés mécaniques résultantes s'avère indispensable en vue d'identifier les paramètres du procédé FSW optimisés.

2. Avancement

Une campagne d'essais a été réalisée dans le but de mettre en évidence l'effet de la vitesse d'avance, de la vitesse de rotation et de l'effort appliqué. Au total, 14 soudures ont été produites et caractérisées à différentes échelles.

La tomographie à rayons X a permis de révéler le flux de matière le long du cordon de soudure. En particulier, la taille et la forme des crochets de Ti-6Al-4V varient suivant les paramètres. Leur hauteur diminue pour des faibles flux de chaleur. Une analogie avec la formation des copeaux en usinage a pu être identifiée.

Les évolutions microstructurales ont été mises en évidence par des observations au microscope optique et au MEB, couplées avec des mesures de micro-dureté. Au sein de l'alliage Al2024-T3, la dureté varie suivant les paramètres, pouvant mener à un adoucissement ou à un durcissement du centre de la soudure. Ces évolutions résultent des interactions entre les phénomènes de précipitation, d'écrouissage et de recristallisation. Pour des flux de chaleur élevés et en particulier une faible vitesse d'avance, la formation d'une couche « réactive » au niveau de l'interface apparait. Les résultats d'analyse chimique suggèrent la formation de composés intermétalliques Ti_XAl_Y.

Des essais de traction-cisaillement avec corrélation d'images ont permis de caractériser la résistance mécanique des soudures. La force à rupture des soudures augmente pour des faibles flux de chaleur. Elle atteint néanmoins pour le meilleur des cas un coefficient de joint de 35% en terme de résistance mécanique. Les résultats de corrélation d'images ont permis de faire ressortir l'évolution du champ de déplacement au cours de l'essai. Il apparait, pour l'ensemble des soudures, que la déformation se localise au niveau du crochet de Ti-6Al-4V côté avançant et conduit à une rupture par décollement.

3. Conclusions et perspectives

Les résultats de cette première campagne d'essai ont permis de mettre en évidence le rôle des crochets de Ti-6Al-4V sur la résistance mécanique des soudures. Du fait de l'acuité élevée du crochet côté avançant, ce dernier agit comme une entaille menant à une localisation de la déformation avant même que l'alliage d'aluminium ne puisse se déformer. Il convient donc de réduire ce flux de matière en modifiant la géométrie et les dimensions de l'outil. De plus, des analyses EBSD et des observations au MET seront prochainement engagées dans le but de comprendre la contribution des différents phénomènes interagissant sur l'évolution de la dureté du 2024-T3. Enfin, l'influence des paramètres sur le flux de chaleur généré sera évaluée par des essais de thermographie.

Références

[1] R. S. Mishra et Z. Y. Ma. Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering: R*, Vol. 50, n° 1, p. 1-78, août 2005.

[2] A. Simar et M.-N. Avettand-Fènoël. State of the art about dissimilar metal friction stir welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 22, n° 5, p. 389-403, juill. 2017.

Influence de la microstructure obtenue par procédé de fabrication additive SLM sur le comportement mécanique de revêtements base Cobalt

Doctorant : Tarek YOUNSI[1]
Directeurs de thèse : Christine BOHER[2], Adriana SOVEJA[3].

[1] tarek.younsi*@mines-albi.fr*
[2] *christine.boher@mines-albil.fr*, [3] *adriana.soveja@univ-tlse2.fr*.

Résumé – L'objectif de ce travail est de mettre en évidence les mécanismes de plasticité en fonction de la teneur en fer dans un revêtement base Cobalt. Le procédé SLM est ici employé pour réaliser des dépôts en alliage de Cobalt sur un acier C38 et on s'intéresse à la modification de la microstructure engendrée par la diffusion du Fer. En première approche, il a été montré que la teneur en Fer et la structure cristalline des revêtements dépendent préférentiellement du nombre de couches déposées pour faire le revêtement et non des paramètres du procédé. La dureté moyenne des dépôts est liée à la microstructure obtenue et non aux paramètres du procédé.

Abstract – The objective of this work is to highlight the mechanisms of plasticity as a function of the iron content in the Cobalt-based coating. The SLM process is here used to manufacture Cobalt based alloy coatings on C38 steel. We are interesting on the microstructure modifications caused by iron diffusion. . In first approach, it was demonstrated that the Iron content and the crystalline structure of the coatings depend preferably on layers number of coating and not the process parameters. The averaging hardness of coating is linked to the microstructure and not on the process parameters to obtain coatings.

1. Introduction et démarches

Les alliages de Cobalt sont généralement utilisés comme revêtements afin d'améliorer les propriétés de surface telles que la résistance à l'usure et la corrosion. Les procédés classiques de dépôts sont la projection laser et le dépôt filaire.

Dans le cadre de ce travail, le procédé SLM est utilisé afin d'obtenir des revêtements en alliage de Cobalt sur un substrat en acier C38 de géométrie cylindrique. Compte-tenu des énergies mises en jeu dans ce type de procédé de dépôt, il se produit un phénomène courant qui est la diffusion du Fer du substrat vers le revêtement [1,3]. Il a été montré lors de travaux précédents que cette diffusion impacte les mécanismes d'accommodation en plasticité sous sollicitation tribologique [1,2]. L'objectif premier de ce travail expérimental était d'obtenir des dépôts à différentes teneurs en Fer et différents états microstructuraux à partir d'un jeu de paramètres sur le procédé SLM. Les premiers résultats ont montré qu'il faut « jouer » sur l'épaisseur des revêtements (tout autre paramètre constant) et non sur les paramètres du procédé pour faire varier la teneur en fer dans le revêtement.

Dans ce travail sont présentées les modifications de microstructure des revêtements en fonction du nombre de couches. Une machine SLM125HL est utilisée. Une première campagne de fabrication a été réalisée sur des plots de diamètre 10mm, pour une épaisseur de revêtement égale à 4 couches dans un cas et à 40 couches dans un autre. Un deuxième plan de fabrication a été réalisé sur des plots de diamètre 24mm afin d'obtenir des revêtements à différents nombres de couches. Selon ce procédé, l'épaisseur de couche est de 50µm et la distance entre 2 passes laser de 120µm. La puissance et la vitesse préconisées par le constructeur étant respectivement 275w et 800mm/s.

2. Résultats et perspectives

Sous certaines conditions de fabrication la diffusion du Fer en surface a bien lieu. A une épaisseur égale à 4 couches de dépôts, le Fer diffuse jusqu'à la surface et la microstructure est biphasée, hors équilibre, composée d'une phase cubique centrée et d'une phase cubique faces centrées (Figure 1).

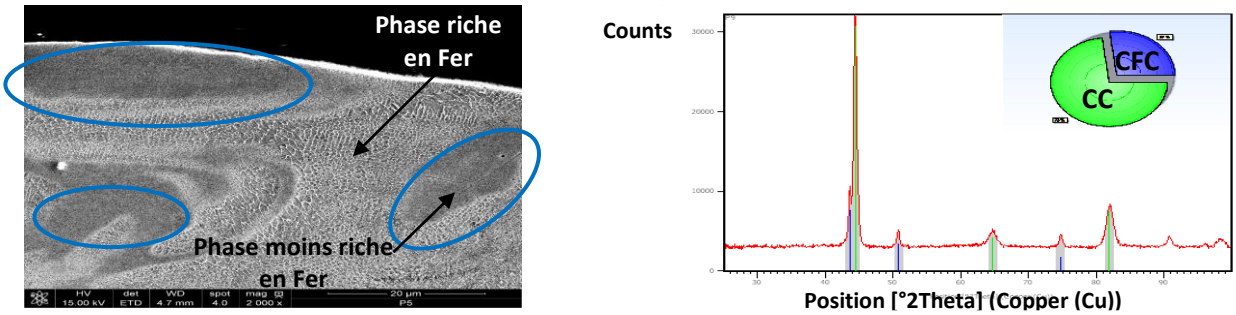

Figure 1 – Microstructure et structures cristalline du revêtement à 4 couches élaboré par SLM pour P=275w et V=800mm/s: a) MEB, b) DRX

A 40 couches de dépôt, le Fer ne diffuse qu'à une certaine épaisseur du revêtement. Ceci a été mis évidence par une méthode de caractérisation dite par polissages successifs qui a révélé que la microstructure est biphasée à l'interface. Cette interface est définie par la région pour laquelle les deux phases coexistent (CFC et CC). Au-delà de cette zone la microstructure est monophasée (CFC) et spécifique à la microstructure du Co à l'état hors équilibre indépendamment des paramètres du laser.

La diffusion du Fer dépend également de l'intervalle de retour du laser entre couches successives. En effet, la teneur massique en Fer qui diffuse en surface ainsi que la phase cristalline cubique centrée qui se crée, sont d'autant plus importants que cet intervalle est réduit (Figure 2). De même, la dureté moyenne du revêtement est également augmentée car on suppose que la phase notée Cubique centrée sur les pics DRX serait en réalité une phase martensitique issue de la trempe. Ce dernier point reste à confirmer car plusieurs hypothèses sont émises.

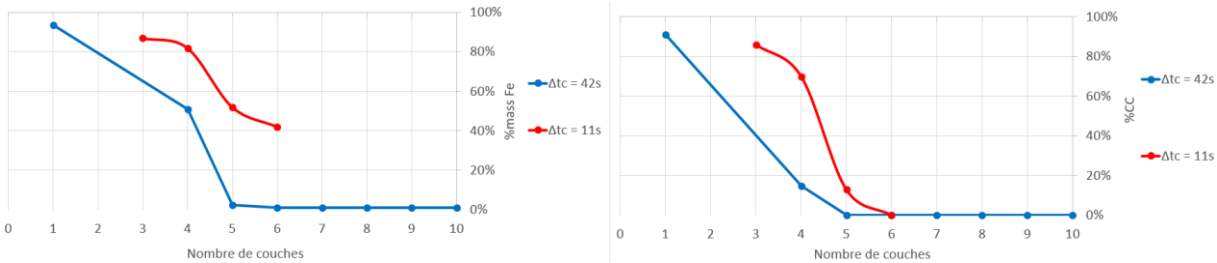

Figure 2 – Comparaison de la diffusion du Fer et la composition en phase pour deux temps de refroidissement Δtc entre couches : a) Teneur massique en Fer, b) Pourcentage en phase CC

En s'appuyant sur les résultats obtenus dans le cadre de cette étude microstructurale, il a été conclu que le nombre de couches et l'intervalle de refroidissement entre 2 couches sont les paramètres de fabrication qui déterminent la variation de la teneur du Fer diffusée en surface. En s'appuyant sur les résultats obtenus nous allons réaliser des dépôts à différents nombres de couches sur des éprouvettes parallélépipédiques (essais de fatigue en flexion 4 points) et sur des disques de frottement (essais de tribologie de type bille sur disque). Il est prévu par la suite de déterminer le niveau de charge et la teneur en Fer nécessaires pour donner lieu à une transformation de phase induite par déformation plastique pour ces deux types de sollicitation.

3. Références bibliographiques

[1]. E. Cabrol, C. Boher, V. Vidal, F. Rézaï-Aria, F. Touratier, Plastic strain of cobalt-based hardfacings under friction loading, *Wear*, Vol. 330-331, Pag. 354-363, 2015.

[2]. Š. Houdková, Z. Pala, E. Smazalová, M. Vostřák, Z. Česánek. Microstructure and sliding wear properties of HVOF sprayed, laser remelted and laser clad Stellite 6 coatings, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 318, Pag. 129-141, 2017.

[3]. J. Tuominen, J. Nakki, J. Poutala, J. Miettinen, T. Peltola, P. Vuoristo, I. Rasehorn, M. Alam. Fatigue behavior of laser clad round steel bars, *Journal of Laser Applications*, Vol. 27, Num 1, Pag.012006, 2014.

Modélisation numérique des structures haute résistance soumises à des sollicitations sévères

Doctorant : Konstantinos NIKOLAKOPOULOS[1]
Encadrants : Patrice LONGERE[2], Jean-Philippe CRETE[3]

[1] *konstantinos.nikolakopoulos@isae-supaero.fr*
[2] patrice.longere@isae.fr, [3] *jean-philippe.crete@supmeca.fr*

Résumé — On s'intéresse ici à la prédiction numérique de la résistance résiduelle de structures métalliques de grandes dimensions lorsqu'elles sont soumises à des surcharges accidentelles. Les métaux ductiles sont largement utilisés dans l'industrie aéronautique et navale et leur rupture se déroule généralement en trois étapes, à savoir l'endommagement, la localisation de déformation/endommagement et la fissuration. Dans cette thèse, une méthodologie unifiée pour le traitement de l'apparition et de la propagation de fissures ductiles en 3D est développée, en tant que routine utilisateur Abaqus (UEL).

Abstract — We are here interested in the numerical prediction of the residual strength of large metallic engineering structures when they are submitted to accidental overloads. Ductile metals are widely used in the aeronautical and naval industry and their failure is generally characterized by a three-stage process, namely damage, localization of strain/damage and cracking. In this thesis a unified methodology for the treatment of ductile crack onset and propagation in 3D is developed, as Abaqus user sub-routine (UEL).

1. Introduction

Cette thèse est réalisée en collaboration entre l'Institut Clément Ader (ICA, ISAE-SUPAERO, Toulouse) et le Laboratoire Quartz (ISAE-SUPMECA, Saint-Ouen) et est cofinancé par la Direction Générale de l'Armement (DGA). Son objectif est le développement d'une méthodologie unifiant les trois étapes de la rupture ductile, à savoir : endommagement sous forme de nucléation et de croissance de micro-cavités, localisation de la déformation dans une bande étroite et fissuration, pour la prédiction de la résistance résiduelle de structures métalliques tridimensionnelles. Cette méthodologie est développée en tant que routine utilisateur (UEL) dans le logiciel par éléments finis Abaqus. La première étape est l'endommagement diffus régi par le modèle de GTN [1] et la dernière étape, qui est l'ouverture de la fissure, est décrite cinématiquement par la méthode des éléments finis étendus appliquée par Crété et al. [2] pour les métaux ductiles. La deuxième étape, la plus complexe physiquement et numériquement, est la localisation de la déformation dans une bande étroite. Cette phase de localisation est décrite ici via l'association d'un segment cohésif et d'une discontinuité forte dans le cadre de la formulation XFEM, comme proposé par Wolf et al. [3].

2. Résultats et discussion

Au sein d'une routine utilisateur (UEL) Abaqus ont été implémentés le modèle de plasticité microporeuse de GTN [1] pour décrire les conséquences de l'endommagement ductile et une cinématique enrichie des éléments finis selon la méthode XFEM pour décrire les phases de localisation (XFEM + loi cohésive) et de fissuration (XFEM).

Pour décrire la dégradation progressive du matériau au cours de la phase de localisation, une loi cohésive a été développée, régie par une variable de décohésion D, évoluant entre 0 (cohésion

complète) et 1 (décohésion totale), agissant sur la résistance de la bande selon $\mathbf{T} = (1-D)\mathbf{T}_0$ où $\mathbf{T}_0$ et $\mathbf{T}$ sont respectivement les vecteurs résistance initiale (amorçage de la localisation) et courante de la bande. La perte totale de cohésion marque l'amorçage de la fissuration.

Différents essais de référence ont été simulés. Dans la suite, on présente les résultats concernant la traction uniaxiale d'une éprouvette tri-dimensionnelle. L'éprouvette est maillée avec des éléments hexaédriques à intégration complète (C3D8) sans défaut préexistant. L'hypothèse des petites perturbations est adoptée. Un maillage fin et un maillage grossier ont été utilisés. L'état final de l'éprouvette est montrée en Fig.1(gauche) et les courbes effort de réaction-déplacement pour les deux maillages en Fig.1(droite).

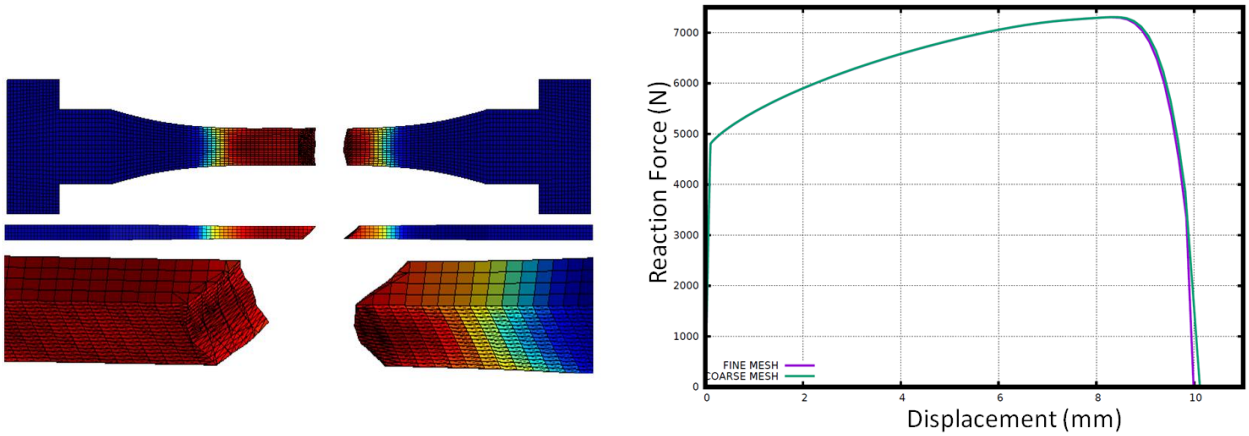

Figure 1 – Traction d'une éprouvette plate. Etat final (gauche) et courbe effort-déplacement (droite)

On peut constater que la méthodologie est capable de reproduire les trois étapes de la rupture ductile, de surcroît en trois dimensions. De plus, la transition entre la phase d'endommagement diffus et la phase de localisation est très régulière. Dans le cas présent de l'éprouvette en traction on observe une objectivité des résultats par rapport au maillage.

Les travaux en cours concernent la prise en compte des grandes déformations ainsi que des chargements transitoires.

3. Références bibliographiques

[1] V.Tvergaard, A.Needleman. Analysis of cupcone fracture in a round tensile bar., Acta metallurgica, Elsevier, 157-169, 1984.

[2] J.P.Crété, P.Longère, J.M.Cadou. Numerical modelling of crack propagation in ductile materials combining the GTN model and X-FEM., Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Elsevier, 204-233, 2014.

[3] J.Wolf, P.Longère, J.M.Cadou, J.P.Crété. Numerical modeling of strain localization in engineering ductile materials combining cohesive models and X-FEM., International Journal of Mechanics and Materials in Design, Springer, 177-193, 2017.

Navigation basée vision pour rendez-vous spatiaux autonomes avec des cibles non coopératives

Doctorant : [1]Anthea Evelina Comellini
Encadrants : [2] Christine ESPINOSA, [3] Emmanuel ZENOU, [4] Vincent DUBANCHET

[1] *anthea.comellini@isae-supaero.fr*
[2] *christine.espinosa@isae-supaero.fr*, [3] *emmanuel.zenou@isae-supaero.fr*, [4] *vincent.dubanchet@thalesaleniaspace.com*

Résumé — Le but de cette thèse c'est de développer des algorithmes de navigation qui exploitent une caméra monoculaire, couplée avec autres capteurs d'image, pour permettre à un satellite chasseur d'estimer l'état (position, attitude et vitesses) d'un objet cible et d'effectuer un rendez-vous autonome et éventuellement le docking ou la capture. L'objet cible, qui est d'une taille inférieure à 10 m, peut être un débris spatial ou un satellite qui n'a pas été conçu pour participer à un rendez-vous et qui n'aura pas un rôle actif dans l'opération.
Abstract —The aim of this thesis is to develop navigation algorithms, based on the exploitation of a monocular camera coupled with other candidate sensors that would enable a chaser object to track a target object in Space environment, in order to allow automated rendezvous and eventually docking or capture. The target object, restraint to a size envelope lower than 10m, could be space debris or a satellite which was not conceived to participate in a rendezvous and will not have an active participation in the operation.

1. Thesis context and development

This thesis addresses the issue of vision based navigation for space rendezvous with non-cooperative (an object that does not have any active control of its position and attitude) and non-collaborative (an object that was not conceived to participate in a rendezvous and therefore is not provided with any passive or active equipment to help the process) targets. Autonomous rendezvous with these targets are key capabilities that will answer to main challenges in space engineering, such as on-orbit-servicing and space debris removal.

Navigation algorithms require accurate, up-to-date measurements of relative pose (location and orientation) and dynamics of the target. Using inexpensive camera sensors (which have low power budget and small form factor so that they are easily integrated to the spacecraft (S/C) without affecting its design), coupled with image processing (IP) and tracking algorithms provides cost effective and accurate estimation.

In space applications, methods depending upon feature detection could be not robust since occlusions, harsh lighting and reflective materials make reliable detection and matching impossible. Nevertheless it is reasonable to assume to have a 3D geometric model of a S/C even if it was not supposed to participate in a rendezvous, thus enabling the use of model-based algorithms, which search for the pose of the 3D model that better matches the observed data in image. For monocular cameras, the more suitable model-based techniques for space application are the ones relying on edge extraction and tracking, since edges are strong features easily detectable in correspondence of high image gradients.

A well-known model-based algorithm relying on edge tracking is RAPiD [4] algorithm. At instant N, the 3D model is projected in the image frame in the estimated pose of instant (N-1), and visible edges are selected and sampled in order to determine a set of control points that will be used in the optimization process. At the same time, edges are extracted on the greyscale image captured at the instant N. The matching between a control point and the corresponding point in the image is done by searching on the direction perpendicular to the projected edge containing the control point. This mono-directional search reduces the matching problem from bi-dimensional to a one-dimensional problem, thus allowing fast tracking. To compute the pose correction, RAPiD method relies on the fact that, to first order, small changes in the model pose will cause displacement of the

projected control points which is linear in the pose parameters. This enables to determine the pose update through the solution of a simple least square problem.

In rendezvous with a non-cooperative target which may be in tumbling, the variation of pose from one frame to the other can be too great to enable linearization, and the tracking is rapidly lost. In order to overcome this problem, this thesis proposes an estimation algorithm relying on a nonlinear cost function optimized through the Levenberg–Marquardt (LM) algorithm, and coupled with a Kalman Filter. The implemented Kalman filter (KF) differs from the ones used in previous works -that propagates simple kinematics model [2,3] - since it propagates a linearized relative translational dynamics relying on the Chloessy-Wiltshire [1] equations and a non-linear rotational dynamics [5], and manages delays up to 1 s for the measurements coming from the IP algorithms.

Since the use of the LM algorithm increases the computational load, a new algorithm that projects the 3D model and computes only the external projected perimeter, thus decreasing the computational load, has been developed. This algorithm has proven to generate fewer mismatches than the former technique and a faster estimation. Finally, a new strategy that searches the matching along the tangent to the apparent trajectory of the body in image frame (thus exploiting the Kalman estimated translation speed and rotation rate) has been investigated.

Algorithms have been tested on a time window of 1000s, on 1000 images evenly spaced. The target was rotating around each body axis with an angular rate of 1deg/s, while the relative translational velocity almost null, in order to analyze the variation of performances of attitude estimation with respect to different relative distances target-camera. Simulations show that RAPiD isn't capable to track the target even at very short distance (5m). On the other side, the LM-based method has been tested in many and various scenarios, demonstrating tracking capabilities up to 50m distance, in presence of non modelled perturbations acting on the target and for rotation rates up to 3deg/s around each axis.

2. Conclusions and future perspectives

The problem of monocular model-based pose estimation for space rendezvous has been addressed, and an innovative method relying on edge extraction and tracking has been proposed. The method has been formally developed, implemented and compared to former method, showing much better performances. The optimal coupling with the KF has been found, enabling, together with the estimation of the pose, the estimation of the translational velocity and rotation rate and managing measurement delays up to 1s.

The estimation chain lacks of a pose acquisition algorithm that enables the initialization of the tracking using as unique information the a priori 3D model. The final goal is to design an algorithm that is capable not only to initialize the pose of the target but also to detect (and manage) some differences in the shape of the target with respect to the a priori model (such as the rotation of the solar array with respect to the central body of the S/C).

In addition, the possibility to exploit the IR camera will be investigated. The IR device will provide images that could be used in the method already developed, providing estimation less sensitive to lighting conditions. Moreover it will be possible to couple the monocular visible camera with the IR camera in order to test the performances of a heterogeneous stereo-configuration between cameras having different resolution and operating in different spectrum.

References

[1] Howard D Curtis. Orbital mechanics for engineering students. Butterworth-Heinemann, 2013.

[2] Richard Evans. Kalman Filtering of pose estimates in applications of the rapid video rate tracker. In BMVC, pages 1-6, 1990.

[3] Martin Armstrong Andrew Zisserman. Robust object tracking. In Proceedings of the Asian Conference on Computer Vision, Singapore, pages 5-8, 1995.

[4] Chris Harris and Carl Stennett. Rapid-a video rate object tracker. In BMVC, pages 1–6,1990.

[5] Gennady Yu Kulikov and Maria V Kulikova. Accurate numerical implementation of the continuous discrete extended kalman filter. IEEE Transactions on Automatic Control, 59(1):273-279, 2014.