

## HABILITATIONS A DIRIGER DES RECHERCHES

**HADDAG Badis**, Université de Lorraine

*Date soutenance* : 6 juillet 2018

**Titre : Modélisation multi-physique et caractérisation expérimentale des procédés de mise en forme avec et sans enlèvement de matière et des systèmes mécaniques**

*Résumé* : Les travaux de recherche résumés pour mon HDR s'articulent principalement autour du comportement des matériaux et du comportement tribologique aux interfaces de contact dans les procédés de mise en forme par ou sans enlèvement de matière et dans les systèmes mécaniques. Les diverses modélisations introduites du comportement en déformation des matériaux couvrent la prise en compte de l'effet du trajet de déformation sur l'écrouissage du matériau, la prise en compte des sensibilités à la vitesse de déformation et à la température, et le couplage avec l'endommagement et la transformation microstructurale du matériau. L'étude du comportement tribologique couvre les aspects d'échange thermique, d'évolution du frottement, et de l'usure aux interfaces de contact. En dernier, dans les applications industrielles (usinage de grands composants et système de liaison rotule) et académiques (ex. coupe orthogonale) traitées, les divers comportements des matériaux et tribologiques sont introduits. L'analyse de ces procédés couvre, entre autres, la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu, la conception d'un outil de coupe, et la mise en place d'un outil d'aide à l'estimation de la durée de vie d'un système mécanique. Les perspectives de ces travaux sont assez larges, étant donné que les comportements des matériaux et tribologiques sont couramment mis en jeu ensemble dans beaucoup de systèmes mécaniques.

*Jury* : Salima Bouvier (rapporteur), Laurent Dubar (rapporteur), Pedro-José ARRAZOLA (rapporteur), Gilles DESSEIN, Enrico FILIPPI, Mohammed NOUARI, Olivier CAHUC, Jean DHERS.

## THESES

**GASNIER Jean-Baptistes**, Mines ParisTech

*Directeurs de thèse* : Hervé Trumel, François Willot, M. Jeulin Dominique, M. Jesus Angulo

*Date soutenance* : 27 septembre 2017

**Titre : Étude du comportement thermo-mécanique et de l'endommagement d'un matériau énergétique granulaire par méthodes de Fourier**

*Résumé* : Cette thèse se propose d'étudier le comportement thermomécanique d'un comprimé au TATB dont le monocristal constitutif est de symétrie triclinique, quasi-hexagonale. De nombreux résultats macroscopiques expérimentaux sont disponibles, mais très peu d'observations in situ ont pu être réalisées et on ne comprend que très peu le fonctionnement du matériau à l'échelle microscopique. L'étude repose sur l'utilisation de méthodes FFT qui sont des méthodes à champs complets pour étudier le matériau au travers de différentes représentations numériques. Plusieurs types de microstructures sont étudiées de façon heuristique par ordre croissant de complexité. Le point de départ est le polycristal parfait de TATB qui surestime les modules mécaniques mais permet déjà de reproduire le comportement thermique du matériau initial. L'ajout de liant et de porosité dans le matériau

s'avère d'un intérêt non négligeable, mais limité. L'étude de différentes populations de microfissures permet de conclure et de comprendre le fonctionnement du matériau. À l'état initial, le matériau possède des fissures plutôt inter-granulaires et décorréliées de sa structure locale, tandis que la chute du coefficient de dilatation thermique ne semble pouvoir être reproduite qu'en présence de fissures dans le plan graphitique des monocristaux.

**HADDAD Mohamed**, Arts et Métiers ParisTech (Angers)

*Directeurs de thèse* : Laurent GUILLAUMAT

*Date soutenance* : 23 octobre 2017

*Titre* : Développement d'un procédé d'enroulement filamentaire adapté aux matériaux composites sandwichs et caractérisation mécanique des matériaux

*Résumé* : Les matériaux composites, et en particulier les sandwichs, sont très étudiés depuis des décennies. En effet, l'alliance entre légèreté et résistance de ces structures entraîne le développement de leur utilisation. Leur méthode de fabrication et éventuellement leur caractérisation restent des points essentiels dans la plupart des études. Ce travail s'inscrit dans le projet FUI SOLLICITERN qui vise à développer une citerne routière en matériau composite sandwich pour un véhicule d'hydrocurage. Comme première étape, et à partir du principe de l'enroulement filamentaire classique, l'objectif consiste à chercher des conceptions qui sont les mieux adaptées à l'enroulement d'un matériau sandwich sur un mandrin cylindrique, tout en respectant les paramètres de l'enroulement et leur influence sur la structure et les propriétés. La solution optimale étant validée, les matériaux constitutifs ont été étudiés en mesurant de nombreuses propriétés mécaniques. L'objectif est de pouvoir aider le bureau d'étude à valider une solution de fabrication et de vérifier que les propriétés sont celles attendues. Pour ce faire, des caractérisations statique et dynamique ont mené sur des échantillons incurvés fabriqués par le procédé optimisé pour notre application. Cette partie comporte notamment différents essais expérimentaux dans le but de valider le comportement de la structure visée avec les dimensions et les combinaisons de matériaux les plus appropriées, en tenant compte du processus de fabrication. La meilleure configuration structurelle est retenue à la fin pour la fabrication de la citerne routière prototype.

**ROIRAND, QUENTIN**, Mines ParisTech

*Directeurs de thèse* : Alain Thionnet, Lucien Laiarinandrasana

*Date soutenance* : 8 novembre 2017

*Titre* : **Modélisation multiéchelle du comportement et de l'endommagement de composites tissés 3D. Développement d'outils numériques d'aide à la conception des structures tissées**

*Résumé* :

Les composites tissés 3D, à l'aide de leurs grandes libertés de conception, peuvent fournir des propriétés mécaniques adaptées aux besoins spécifiques d'une structure. La complexité architecturale de ces matériaux induit néanmoins des propriétés, des comportements ainsi que des endommagements très difficiles à prédire. Les travaux présentés dans ce manuscrit s'inscrivent directement dans cette problématique et cherchent à développer des outils permettant, par simulation numérique, de prévoir les caractéristiques mécaniques de ce type de matériaux. Afin de répondre à cet objectif, une approche multiéchelle, alliant essais expérimentaux et simulations numériques, a été adoptée. Cette démarche permet, en

appliquant des sollicitations réelles, de considérer la géométrie des renforts et les hétérogénéités du matériau, observables à l'échelle mésoscopique, qui sont responsables du comportement macroscopique du composite tissé. Le travail d'investigation expérimentale s'est attaché à caractériser le comportement d'un composite interlock 2,5D et des ses constituants ainsi que les mécanismes et cinétiques de rupture, pour des sollicitations de traction/flexion, grâce à des observations tomographiques aux rayons X et au concept d'interzone. En ce qui concerne la modélisation numérique, un critère de rupture permettant de simuler la dégradation ultime du composite, en coupant les fils de renforts, a été présenté et testé sur une cellule représentative du composite expérimentale. Les résultats en termes de localisations, d'orientations et de cinétiques de l'endommagement sont en accord avec les observations expérimentales. Ensuite, après avoir estimé l'influence des différents paramètres architecturaux sur le critère de rupture avec une campagne de calcul éléments finis, des architectures optimisées, pour les sollicitations considérées, ont pu être proposées et comparées à l'interlock 2,5D. Toujours dans l'optique d'une meilleure prédiction du comportement des composites tissés, les travaux se sont également intéressés à une modélisation plus fine des mécanismes d'endommagement. Une approche fiabiliste a donc été introduite sur le critère de rupture à l'aide d'une distribution statistique de Weibull. De plus, un autre mécanisme d'endommagement a aussi pu être pris en compte dans la modélisation en simulant, avec le modèle GTN (Gurson-Tvergaard-Needleman), la cavitation de la matrice. Enfin, des techniques de réduction de modèle ont été employées pour diminuer le coût calcul de la modélisation multiéchelle afin d'identifier, par exemple, des propriétés matériaux par méthode inverse ou de simuler des essais de fatigue.

## **WEIL HADRIEN, ARTS ET METIERS PARISTECH**

*Directeurs de thèse* : Sébastien JEGOU, Laurent BARRALLIER

*Date soutenance* : 16 novembre 2017

### **Titre : Modélisation du besoin fonctionnel pour la nitruration gazeuse**

Résumé : La nitruration gazeuse est un traitement thermo-chimique permettant une meilleure résistance à la fatigue grâce à l'apport de propriétés mécaniques importantes telles que l'augmentation de la dureté et les contraintes résiduelles de compressions. Cette étude est réalisée sur un acier 33CrMoV12-9 utilisé dans l'industrie aéronautique. Un modèle complet adapté à cette nuance permet de quantifier les profils de contraintes résiduelles et de dureté en fonction des paramètres de nitruration. La prise en compte de l'apport de ces propriétés mécaniques est possible grâce à l'utilisation de critère de fatigue de type Crossland. Ce type de critère est intégré dans une méthodologie, afin de calculer la limite en fatigue dans une couche nitrurée et prédire la résistance de la pièce, ainsi que la potentielle zone d'initiation de rupture en fonction d'un chargement, d'une durée de vie et d'une probabilité à rupture donnés. L'utilisation combinée du modèle de calcul des propriétés mécaniques (dureté et contraintes résiduelles) et de la prédiction de l'initiation de rupture dans un matériau nitruré, rend possible une méthode inverse permettant de calculer les paramètres de nitruration adaptés à un chargement subi. Cette approche se justifie dans le cas de nitruration gazeuse, car il a été démontré lors de cette étude, que ce traitement reste robuste face au chargement subi par la pièce.

**LIU Yu**, CentraleSupélec

*Directeurs de thèse* : Jinbo BAI, Ann-Lenaig HAMON

*Date soutenance* : 10 novembre 2017

**Titre : Etude d'interfaces entre matrice polymère et renforts à base de carbone, à l'aide d'observations multiéchelles et multimodales en microscopie électronique**

*Résumé* : L'interface joue un rôle très important dans la performance globale des composites à base polymère. Une forte adhérence interfaciale est généralement souhaitée pour avoir un transfert de charge efficace de la matrice vers le renfort. Diverses méthodes de traitement de surface pour les renforts ont été développées. Cependant, la physique des interactions entre les renforts et la matrice environnante dans de tels composites n'a pas encore été élucidée, et les méthodes pour étudier les paramètres contrôlant les caractéristiques interfaciales doivent encore faire leurs preuves. Cette thèse vise à étudier le comportement multiéchelle (nano-, micro- et macroscopique) des composites, basé sur une étude fine utilisant les techniques les plus modernes pour comprendre les interfaces et les quantifier. Deux séries de renforts sur une échelle micrométrique, des fibres de carbone (CF) et des matériaux à base de graphène ont été utilisées ici. Pour améliorer l'interaction entre les nanorenforts et la matrice polymère, deux voies principales ont été utilisées dans cette thèse : l'oxydation des renforts et la greffe de nanotubes de carbone sur leur surface. L'étude en elle-même a été menée à une échelle microscopique pour étudier la résistance interfaciale entre une fibre de carbone (CF) et la matrice époxy, avec des essais de traction effectués in situ dans la chambre d'un microscope à double colonne MEB-FIB (microscope électronique à balayage couplé à un faisceau d'ions focalisé). Le faisceau d'ions a été utilisé pour découper une éprouvette de traction du composite contenant à la fois un domaine époxy et un domaine CF. Le champ de traction a été appliqué via le nanomanipulateur et l'essai a été observé via les deux colonnes ionique et électronique, sous deux angles de vue différents. Cela a permis d'estimer le champ de déformation, et donc la résistance interfaciale au moment de la rupture. Une expérience similaire a été menée sur un composite où les renforts sont des nanoplaquettes de graphène. Enfin, l'étude en microscopie électronique en transmission de la région de l'interface entre l'époxy et les renforts a révélé la présence d'une interphase et a permis de mesurer son épaisseur et donner une indication de sa nature. À cette fin, une analyse EELS (spectroscopie par pertes d'énergie des électrons) a été effectuée, permettant de mesurer la densité de l'échantillon très localement (taille de sonde de l'ordre du dixième de nanomètre) en travers ou parallèlement à l'interface. Un scénario sur les modes de liaison chimique entre les deux milieux en fonction du traitement de surface utilisé permet d'expliquer la nature des interphases observées.

**LU Xiaoxin**, CentraleSupélec

*Directeurs de thèse* : Jinbo BAI, Julien YVONNET

*Date soutenance* : 13 novembre 2017

**Titre : Modélisation électro-mécanique multi-échelle des nanocomposites graphène/polymère**

*Résumé* : Cette étude porte sur le développement de modèles et de méthodes numériques pour prédire les propriétés électriques et mécaniques des nanocomposites polymères/graphènes. Dans une première partie, un modèle nonlinéaire de conduction électrique prenant en compte l'effet tunnel est introduit pour déterminer la conductivité effective de ces nanocomposites au travers d'une procédure d'homogénéisation numérique.

Celle-ci, basée sur une formulation éléments finis a mis en évidence l'influence des paramètres microstructuraux sur la conductivité effective au travers d'une étude statistique. Ensuite, un modèle atomistique de l'interface polymère/graphène a été proposé pour valuer les propriétés de l'interface et de l'interphase. Les champs de contrainte et de déplacement ont été identifiés par une extension de la procédure d'Hardy-Murdoch à partir des simulations de mécanique moléculaire. À l'aide de ces champs, un modèle élastique continue avec des interfaces imparfaites a été identifié et comparé aux résultats des simulations de mécanique moléculaire. Finalement, le modèle atomistique a permis d'identifier un modèle de zone cohésive nonlinéaire pour modéliser la décohésion à l'interface polymère/graphène. Une procédure d'homogénéisation numérique par la méthode des éléments finis a été introduite pour estimer les propriétés mécaniques effectives dans le cadre des transformations finies. Les microstructures déformées ont été utilisées dans le modèle électrocinétique pour déterminer l'impact de la décohésion interfaciale sur la conductivité effective.

**POULET Pierre-Alexis**, MINES ParisTech

*Directeurs de thèse* : Lucien LAIRINANDRASANA, Sébastien JOANNES

*Date soutenance* : 24 novembre 2017

**Titre : Effet de la variabilité microstructurale sur le comportement d'un composite UD verre/PA11 : de la caractérisation expérimentale à la modélisation multi-échelle**

Résumé : Dans le domaine des transports, l'allègement des structures est une préoccupation de l'industrie moderne. À cet effet, les matériaux composites unidirectionnels à matrice polymère sont de plus en plus utilisés pour des applications structurelles. Pour mener à bien cette transition technologique, les campagnes expérimentales laborieuses et onéreuses sont progressivement réduites, laissant la place à une caractérisation "numérique" supplétive et ciblée. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de thèse. Le matériau considéré est un composite à matrice thermoplastique (le Polyamide 11) et à renforts unidirectionnels de fibres de verre. Sous sollicitations mécaniques, la variabilité microstructurale, à l'échelle des constituants, engendre des contraintes multi-axiales importantes qu'il est nécessaire d'évaluer. C'est notamment le cas dans les zones où la matrice est confinée par le renfort. Étudier l'échelle microscopique se révèle primordial pour comprendre et simuler les mécanismes de déformation spécifiques à la matrice thermoplastique. En première partie, une campagne expérimentale est réalisée sur le polymère thermoplastique massif. Des éprouvettes axisymétriques entaillées sont sollicitées en traction monotone et suivies in situ en tomographie aux rayons X. Un phénomène de cavitation est observé. Les grandeurs macroscopiques (ouverture d'entaille, réduction diamétrale. . .) mais aussi microscopiques (évolution des cavités considérées en cluster et individuellement) sont analysées de manières qualitative et quantitative. Un modèle Éléments Finis poro-viscoplastique est ensuite proposé et calibré afin de prendre en compte les mécanismes spécifiques de déformation et d'endommagement du polymère observés expérimentalement. La seconde partie est consacrée à l'étude numérique du matériau composite unidirectionnel. La représentation de la microstructure réelle est permise par la génération de cellules périodiques aléatoires et représentatives (vis-à-vis de descripteurs morphologiques). Des calculs micromécaniques sont alors menés et permettent d'accéder aux mécanismes de déformation, aux grandeurs locales et au comportement mécanique du composite (en élasticité linéaire et au-delà). Une attention particulière est portée à la représentativité des grandeurs calculées. Enfin, une démarche multi-échelle est proposée. Une homogénéisation

numérique par un milieu de substitution permet de réaliser des calculs de structure tandis qu'une relocalisation sur certains points critiques donne accès aux grandeurs locales.

**HUANG Liang**, Université Pierre et Marie Curie

*Directeur de thèse* : Maxime Sauzay

*Date soutenance* : 6 décembre 2017

**Titre : Simulation micromécanique et étude expérimentale de l'endommagement par fluage des aciers austénitiques inoxydables**

Résumé : L'acier austénitique inoxydable 316L(N) et l'alliage 800 sont des candidats potentiels pour des éléments de structures des réacteurs nucléaires de génération IV. Les durées de vie envisagées peuvent atteindre 60 années sous chargement de fluage (contrainte constante à haute température). Il est donc nécessaire de caractériser et de prendre en compte les mécanismes d'endommagement durant de très longs temps de fluage afin de proposer des prédictions de durées de vie plus fiables que de simples extrapolations à partir des résultats des essais court terme (de l'ordre d'une année).

Le modèle de Riedel est basé sur la germination continue de cavités (loi de Dyson) et la croissance de cavités par diffusion des lacunes le long des joints de grains. Les durées de vie en fluage sont correctement prédites par la combinaison des modèles de striction (court terme) et de Riedel (long terme). Les prédictions sont en accord avec les durées de vies les plus longues observées, soit 25 ans, pour l'acier 316L(N) et d'autres aciers austénitiques inoxydables. Aucun paramètre ajusté n'a été utilisé dans le modèle de Riedel. Cependant, le préfacteur de la loi de Dyson devait, jusqu'à présent, être mesuré expérimentalement.

Les cavités se forment principalement aux interfaces entre particules de phase secondaire intergranulaires et matrice austénitique. Grâce à des calculs par éléments finis cristallins (logiciel Cast3M), les concentrations de contraintes à aux interfaces matrice-précipité ont été calculées en considérant les hétérogénéités microstructurales, telles que les orientations cristallographiques aléatoires des grains voisins, l'orientation des joints de grains par rapport à l'axe de traction et les paramètres définissant la géométrie des particules (facteur de forme, géométrie des extrémités). Les résultats montrent que quinze couples d'orientations cristallographiques conduisent une distribution de contrainte normale d'interface suffisamment précise. Les résultats des calculs par élément finis nous permettent de proposer une formule multiplicative visant à calculer la distribution des contraintes normales d'interface, en prenant en compte toutes les hétérogénéités microstructurales.

En appliquant un critère en contrainte à rupture aux distributions des contraintes normales d'interface, la loi de Dyson et l'existence d'une déformation macroscopique critique sont retrouvées, en particulier la linéarité entre la densité de cavités et la déformation viscoplastique au-delà de ce seuil. En combinant ces résultats avec un critère énergétique de rupture simplifié, il est possible d'introduire un effet de taille des particules. Le pré-facteur de la loi de Dyson prédit est du même ordre de grandeur que celui mesuré expérimentalement, ainsi que la déformation critique. Les sites préférentiels de germination prédits expliquent de nombreuses observations (effet d'orientation du joint de grain, rupture interfaciale plutôt que intra-particule). Notre travail conduit à proposer un fondement théorique de la loi phénoménologique de Dyson, basée sur la nature aléatoire de la microstructure et sa caractérisation statistique. Ces résultats pourraient se généraliser à de nombreux autres alliages soumis à des endommagements intergranulaire, ductile ou fragile.

**CHOUPIN Tanguy**, Arts et Métiers ParisTech

*Directeurs de thèse* : Gilles Régnier, Bruno Fayolle

*Date soutenance* : 7 Décembre 2017

**Titre : Performances mécaniques de composites à matrice thermoplastique PEKK en lien avec leurs paramètres de mise en œuvre**

**FARAHMANDPOUR CHIA**, Université Pierre et Marie Curie

*Directeurs de thèse* : Yves Berthaud, Hélène Dumontet, Sophie Dartois, Marc Quiertant

*Date soutenance* : 4 décembre 2017

**Titre : Modélisation et simulation du comportement des bétons confinés**

*Résumé* : Depuis de nombreuses années, les techniques de renforcement de structures en béton armé (BA) par collage de polymères renforcés de fibres (PRF) trouvent un important champ d'applications dans le renforcement parasismique des poteaux en BA. Le chemisage par PRF confine le noyau du poteau et permet d'augmenter sa résistance et sa ductilité. Bien que de nombreux travaux expérimentaux aient été consacrés à l'étude de l'effet de confinement du PRF sur le comportement des poteaux en BA, la réalisation d'une simulation réaliste de la réponse structurelle de tels éléments présente encore de nombreuses difficultés liées aux modèles de comportement peu appropriés à reproduire précisément la réponse mécanique du béton confiné. Dans cette recherche, un modèle de comportement elasto-plastique endommageable est développé pour reproduire la réponse mécanique du béton sollicité suivant un chemin triaxial de contraintes. Ce modèle prend en compte différents mécanismes de comportement du béton tels que les déformations irréversibles, l'endommagement dû à la microfissuration, la sensibilité au confinement et les caractéristiques de dilatation. Un processus d'identification des paramètres du modèle est proposé sur la base d'essais classiques. Ce processus est mis en œuvre sur différents bétons usuels. La validation de ce modèle est ensuite démontrée en comparant des résultats de simulations à des données expérimentales de la littérature sur des bétons confinés activement puis des bétons confinés par des PRF présentant une large gamme de rigidité. Le modèle proposé est également comparé à différentes modélisations de la littérature. Les capacités du modèle sont illustrées et analysées sur des applications tridimensionnelles de poteaux en BA de taille réelle, non confinés et confinés par PRF.

**VERMUNT Joris**, Ecole des Mines de Saint-Etienne

*Directeurs de thèse* : Helmut KLOCKER, Gilles DAMAMME

*Date soutenance* : 19 décembre 2017

**Titre : Étude de la fragmentation dynamique d'enveloppes métalliques accélérées**

*Résumé* : Les études de la fragmentation dynamique d'enveloppes métalliques sont importantes dans le domaine militaire, aérospatial, automobile ou encore nucléaire. Pour la Défense, ces études permettent d'estimer des zones de sécurité autour des corps de bombes. On ne s'intéresse pas dans ces travaux aux études balistiques ou à la définition statistique des zones de sécurité. On cherche à analyser les phénomènes physiques influençant la fragmentation. L'objectif est de prévoir les dispersions massiques et spatiales des éclats générés par la fragmentation d'une enveloppe métallique en expansion inertielle très rapide. Les travaux sont basés sur l'approche dynamique et probabiliste de Mott. Dans

cette thèse, on étudie les cas d'une barre et d'un tore. On distingue trois phénomènes physiques primordiaux :

- Le premier phénomène consiste à étudier une loi statistique de localisations de déformation. Mott a proposé plusieurs modèles, mais aucun ne tient compte des hétérogénéités initiales du matériau. Nous avons identifié cette loi pour une nuance d'acier 35NCD16 et réalisés une étude paramétrique dont les résultats permettent de mieux comprendre la formation de ces localisations.
- On modélise ensuite l'endommagement des sites de localisations de déformation. Nous avons introduit dans nos modèles une loi d'endommagement innovante qui ne tient pas compte du chemin de propagation des fissures. Cette dernière nous permet de modéliser une zone de relâchement de contraintes.
- Le dernier phénomène étudié est l'interaction entre les ondes successivement générées. Nous avons ainsi pu obtenir la dispersion massique des éclats à partir d'un modèle physique pour un tore unidimensionnel en expansion.

**LEVEUF Louis**, IRDL, ENSTA Bretagne

*Directeurs de thèse* : Yann MARCO, Vincent LE SAUX

*Date soutenance* : 7 décembre 2017

**Titre : *Fatigue des thermoplastiques renforcés de fibres de carbone pour application aéronautique : caractérisation rapide et critère de dimensionnement***

*Résumé* : Cette étude présente la caractérisation du comportement mécanique et la tenue en fatigue d'un composite thermoplastique à matrice PEEK renforcée en fibres de carbone courtes pour des applications aéronautiques. La première partie présente la description des matériaux étudiés ainsi que la mise en place d'un protocole de caractérisation de la microstructure. Il est alors mis en avant la nécessité de générer des éprouvettes de caractérisation simples en introduisant le concept d'éprouvettes amincies. Dans un second temps, la méthode d'auto-échauffement en régime transitoire est appliquée en concluant sur l'influence de différents paramètres sur le bilan énergétique tels que la microstructure ou le grade du matériau étudié. La troisième partie présente l'établissement d'une loi de comportement phénoménologique avec une prise en compte locale de l'anisotropie par des approches micromécaniques classiques. Les simulations mécanique et énergétique donnent des résultats corrélant très bien avec l'expérimentale pour une distribution d'orientation proche de 0° et des résultats moins convaincants pour une distribution d'orientation proche de 90°. La dernière partie présente l'utilisation d'un protocole de caractérisation rapide basé sur les essais d'auto-échauffement. Cette approche, validée pour les différents matériaux étudiés, permet de prédire la courbe d'endurance en fatigue déterministe avec une seule éprouvette et en une demi-journée d'essais. Il est également mis en évidence qu'un critère énergétique à deux paramètres est indépendant de la distribution d'orientation, et qu'il est possible de discriminer rapidement en fatigue les différents matériaux étudiés.

**SANITAS Antonin**, MSMP, Arts et Métiers ParisTech

*Directeurs de thèse* : Mohamed EL MANSORI, Marie BEDEL

*Date soutenance* : 19 décembre 2017

**Titre : *ETUDE EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE DE LA COULÉE BASSE-PRESSION DE L'ALLIAGE DE MAGNÉSIUM RZ5 DANS DES MOULES IMPRIMÉS EN 3D***

*Résumé* : L'utilisation d'alliages de magnésium est d'un intérêt majeur pour l'allègement des structures dans le domaine aéronautique. Leur principal inconvénient est leur forte

oxydation rendant leur coulée hasardeuse. Aujourd'hui, l'association de la simulation numérique avec les procédés automatisés d'impression 3D de moule en sable et de coulée Basse-Pression (BP) promet l'amélioration de la robustesse de fabrication tout en limitant les itérations à l'échelle industrielle. Toutefois, ces méthodes récentes souffrent d'un manque de données sur la préparation et la génération des défauts lors du remplissage des alliages comme le RZ5. Dans ce travail, après avoir défini dans quelle mesure les règles métiers actuelles de préparation des alliages Mg-Zr sont adaptées au procédé BP, des essais de coulabilité expérimentaux à l'échelle industrielle ont été développés. L'analyse des données expérimentales et des simulations numériques des écoulements permettent d'établir des modèles analytiques de prédiction du risque d'inclusions d'oxydes et de malvenue. Ces modèles sont utilisés pour proposer une cartographie du procédé limitant les défauts de remplissage. Une méthodologie de conception des grappes de coulée spécifique à la BP est proposée puis est appliquée pour la fabrication d'une pièce industrielle en RZ5.

**ACHOUR-RENAULT Nadia**, Arts et Métiers ParisTech

*Directeurs de thèse* : Fodil MERAGHNI, Joseph FITOUSSI, George CHATZSIGEORGIOU

*Date soutenance* : 22 décembre 2017

**Titre : Modélisation Multi-échelles et analyse expérimentale du comportement de composites à matrice thermoplastique renforcées en fibres de verre sous sollicitations dynamiques modérées**

*Résumé* : Le présent travail de thèse a pour objectif de développer un outil de modélisation par transition d'échelles sous forme de machine d'essais virtuels. Celle-ci, utilisée conjointement aux codes de calculs de structures, permet de déterminer le comportement anisotrope complexe de composites à matrice polypropylène chargés en fibres de verre courtes sous sollicitations dynamiques. La microstructure en cœur-peau induite par le procédé d'injection du matériau est investiguée expérimentalement par  $\mu$ CT. Le comportement dynamique est caractérisé pour des vitesses de déformation allant jusqu'à 200s<sup>-1</sup> au moyen d'une méthodologie expérimentale basée sur l'utilisation d'un joint d'amortissement et d'une optimisation des éprouvettes. Les mécanismes d'endommagement sont analysés expérimentalement par essai in situ. Ils mettent en évidence le phénomène d'endommagement prépondérant qui est la décohésion de l'interface fibre matrice. Basé sur ces résultats expérimentaux, l'approche multi échelles développée consiste en une méthode de Mori Tanaka incrémentale appliquée à une matrice élastoviscoplastique et des renforts enrobés intégrant l'évolution de l'endommagement à l'échelle mésoscopique. L'endommagement introduit dans les enrobages perturbe le transfert de charge entre la matrice et les renforts. De plus, la dépendance à la vitesse de déformation, aux orientations et aux taux de fibre du modèle sont corrélés par des essais. La machine d'essais virtuels est validée par modélisation de structures. L'outil prédictif ainsi développé prend en compte le minimum nécessaire à la description de la microstructure tout en étant fiable et pertinent dans la modélisation de composites sous sollicitations dynamiques modérées.

**CHABCHOUB Manuel**, INSA Rouen

*Directeurs de thèse* : Mohamed TAKTAK, Benoit VIEILLE, Lakhdar TALEB, Mohamed HADDAR

*Date soutenance* : 15 décembre 2017

**Titre : Contributions à la mécanique de la rupture des matériaux composites thermoplastiques à haute température : analyses expérimentales et numériques**

*Résumé* : The present work was aimed at investigating the fracture mechanics in woven-ply TP (PPS) based laminates at  $T > T_g$ . A fractography analysis and microscopic observations of fracture surfaces were used to apprehend the damage mechanisms in C/PPS at high temperature (HT) in the presence of a crack. For quasi-isotropic laminates (elastic brittle behavior), several techniques were used to investigate the tenacity at initiation and propagation. In particular, the acoustic emission showed to be particularly relevant as it allows to detect the crack initiation, propagation but also to follow the evolution of the damage. For cross-ply laminates (ductile behavior), an approach based on the calculation of integral J using the load separation method was used. This method showed its capability to provide the J-R curves of composites with very ductile HT behavior for different crack length over specimen width ratios  $a/W$ . Numerically, a linear spectral viscoelastic model and a generalized Norton viscoplastic model were used to account for the time-dependent behavior of C/PPS composite laminates at HT. To precisely evaluate the fracture parameters in TP-based laminates, a study on the mesh type and its refinement was carried out. Finally, based on the selected mesh and using the finite element code Cast3m, the  $G_0$  method was applied in order to test its capability to determine J for different loading levels.

**NGUEMALIEU KOUETCHA Daniella**, Polytech Orléans

*Directeurs de thèse* : Eva KOVACEVIC, Nathalie MATHIEU, Hamidrèza RAMEZANI

*Date soutenance* : 21 décembre 2017

**Titre : Adsorption dans un milieu carboné lamellaire nanoporeux : simulation Monte Carlo Grand Canonique, synthèse et caractérisation**

*Résumé* : Les carbones désordonnés nanoporeux sont des supports efficaces pour le piégeage de polluants y compris à l'état de traces dans les eaux usées. Le phénomène d'adsorption à l'origine de la rétention des molécules est cependant complexe car dépendant d'une multitude de facteurs : structure, morphologie et charge de la surface carbonée d'une part, taille/forme et polarité de la molécule d'autre part, l'ensemble étant dépendant du pH et de la concentration. Pour une meilleure compréhension du phénomène, il est important de pouvoir étudier séparément certains paramètres. Dans la perspective d'étudier le phénomène d'adsorption en milieu aqueux sur des carbones nanoporeux à structure et morphologie modèle, des structures lamellaires nanoporeuses de type carbone turbostratique ont été générées numériquement en langage C++ avec le calcul de la fonction de distribution radiale ou de paires. L'adsorption gazeuse d'une molécule non polaire ou polaire puis de deux molécules polaires ( $H_2O/CO_2$ ) et ( $H_2O/C_6H_6O$ ) a été simulée par la méthode Grand Canonique Monte Carlo sur ce support modèle (Isotherme d'adsorption, chaleur d'adsorption, densité des molécules adsorbées) en fonction de la température. Les temps de calcul ont été drastiquement diminués en développant des codes parallèles optimisés sous MPI C++. L'influence de la forme et de la distribution en taille des pores a été mise en évidence en simulant l'adsorption sur la structure d'un carbone activé déjà obtenue par reconstruction 3D de type « Reverse Monte Carlo » (RMC). Enfin, d'un point de vue expérimental, l'intercalation d'ions tetraalkylammonium par voie électrochimique dans des carbones lamellaires (HOPG et graphite) a été explorée en vue d'obtenir des carbones lamellaires nanoporeux (1nm). La structure a été caractérisée par diffraction des rayons X.

**BURGARELLA Boris**, LMA Marseille

*Directeurs de thèse* : Frederic LEBON

*Date soutenance* : 12 janvier 2018

**Titre : Comportement viscoélastique effectif d'un thermoplastique thermostable renforcé par des fibres courtes**

*Résumé* : L'objectif de cette thèse est de contribuer à la modélisation du comportement visco-élastique linéaire de matériaux composites à matrice thermoplastique renforcée par des fibres courtes à différentes températures. Les travaux présentés portent en particulier sur du PEEK renforcé par des fibres de verre et sont divisés en trois parties correspondant respectivement à la caractérisation expérimentale de la matrice, l'établissement d'une méthodologie de modélisation sur un cas simplifié puis l'application de la méthodologie développée au cas du composite PEEK/Fibres de verre. La méthodologie proposée consiste en l'établissement d'un méta-modèle phénoménologique permettant de prévoir les propriétés effectives du composite en fonction de variables microstructurales (taux volumique de renfort et dispersion d'orientation des fibres). Ce dernier est construit en utilisant une série d'expérimentations numériques réalisées à l'aide de calculs d'homogénéisation en champs complets basés sur les transformées de Fourier rapides (FFT). Enfin, la pertinence du modèle est validée par des comparaisons entre les estimations obtenues à l'aide du méta-modèle et des résultats de références.

**REN Sicong**, Mines ParisTech

*Directeurs de thèse* : Thilo MORGENEYER, Matthieu MAZIERE

*Date soutenance* : 18 janvier 2018

**Titre : Field measurements and finite element simulations of the interaction between dynamic strain ageing and ductile damage in metallic alloys**

*Résumé* :

Récemment, les observations in-situ par laminographie aux rayons X (au synchrotron) montrent que les multiples bandes de localisation sont les précurseurs de l'endommagement et éventuellement de la rupture en biseau. Ces bandes peuvent être liées aux phénomènes de vieillissement par la déformation (type effet de Lüders ou Portevin-Le Chatelier (PLC)) dont l'influence sur la rupture est encore mal compris. Ces effets sont pourtant observés dans de nombreux alliages industriels comme les aluminiums de la série 2000 ou 5000, ou par exemple, dans le cas des aciers C-Mn pour lesquels un creux de ductilité est observé dans la gamme de température où ces effets sont les plus marqués. L'objectif de la thèse consiste à caractériser l'effet PLC et évaluer son influence sur le développement de l'endommagement et donc sur la rupture finale. D'abord, l'effet de vieillissement sur l'écroutissage a été introduit dans un modèle basé sur la densité de dislocations en utilisant les résultats dans la littérature. Ensuite, certains alliages d'aluminium de la série 2000 et un acier C-Mn ont été étudiés par essais mécaniques avec corrélation d'images. Le déclenchement prématuré de localisation a été observé pendant les essais de relaxation, de déchargement et de changement de vitesse pour certains alliages d'aluminium. Les bandes autour de l'entaille dans l'éprouvette d'acier C-Mn ont été observées à haute température. Deux modes de rupture différents ont été observés dans les deux températures. Ces résultats sont comparés avec ceux du modèle KEMC. Enfin, un modèle de comportement couplant les effets de vieillissement (type KEMC) et d'endommagement (type Rousselier) a été développé pour tenter d'expliquer les interactions observées expérimentalement entre ces deux phénomènes.

**DJUIDJE-DZUMGAM Josiane**, Université Paris Sud

*Directeurs de thèse* : C. Berdin, M. Andrieux

*Date soutenance* : 30 janvier 2018

**Titre : Synthèse et résistance mécanique des couches d'oxyde de Zirconium**

**Résumé** : L'objectif de cette thèse est d'étudier la résistance mécanique de couches de zircons ( $ZrO_2$ ) sur deux substrats différents (Zy-4 et 304L). Le dépôt MOCVD, l'oxydation naturelle sous air et l'oxydation naturelle suivie d'un dépôt MOCVD ont été utilisés pour synthétiser les couches de zircone d'environ  $1\ \mu m$  d'épaisseur. Dans un premier temps, nous avons déterminé les conditions optimales pour le dépôt MOCVD sur les deux types de substrat, à  $400^\circ C$  et  $500^\circ C$ . Les deux autres techniques d'élaboration nous ont permis d'obtenir des couches plus épaisses et de composition différente, en termes de fractions de phases quadratique et monoclinique. Nous avons caractérisé les phases présentes dans les couches par DRX, ainsi que les contraintes résiduelles. Grâce à un chargement de flexion ou de traction dans l'enceinte d'un MEB, nous avons réalisé des essais de multifissuration. Sur le Zy-4, nous avons obtenu le schéma classique d'endommagement : apparition de fissure perpendiculaires à la direction d'extension, augmentation du nombre de fissures jusqu'à saturation de la multifissuration. Sur le 304L, nous avons observé une hétérogénéité de fissuration pour les couches les moins épaisses, qui peut être due à la taille des grains du substrat par rapport à l'épaisseur de couche. Nous avons modélisé les essais de flexion du système couche/substrat par éléments finis, afin d'obtenir les déformations dans la couche au début du phénomène de fissuration et ainsi déterminer la résistance des couches. On montre que la distance entre les fissures à saturation ne dépend ni des phases, ni des contraintes résiduelles. La résistance des couches à la fissuration ne dépend pas de la fraction de phase quadratique et ne semble pas dépendre des contraintes résiduelles. La prise en compte des contraintes résiduelles pour expliquer l'amorçage des fissures conduit à supposer que ces contraintes sont fortement hétérogènes dans les couches.

**GRANDGEORGE Paul**, IRDL

*Directeurs de thèse* : Arnaud ANTKOWIAK, Sébastien NEUKIRCH

*Date soutenance* : 9 février 2018

**Titre : Le flambage élasto-capillaire de fibres et de membranes fibreuses fines pour la conception de matériaux étirables**

**Résumé** : Cette thèse porte sur les interactions mécaniques entre liquides et structures élastiques fines. Dans un premier temps, on s'intéresse à une goutte liquide posée sur une fibre horizontale indéformable. L'influence de la tension de surface et de la gravité sont révélées par une étude numérique et analytique du système. Cette compréhension nous permet d'introduire un outil de mesure de rayon de fibre précis, validé expérimentalement sur des fibres microniques. Mais les forces capillaires développées par les gouttes peuvent être suffisantes pour déformer de fines fibres élastiques. Par exemple, lorsqu'elle est comprimée, une fibre de soie de capture d'araignée flambe et s'enroule au sein des gouttes d'eau qui la décoorent naturellement. Cet enroulement élasto-capillaire octroie une extensibilité apparente remarquable à la fibre composite qui s'enroule et se déroule spontanément, assurant ainsi la tension du système au gré des déformations imposées. Ce comportement mécanique peut revêtir un intérêt particulier pour les connecteurs électroniques étirables mais la rigidité de fibres métalliques compromet l'enroulement élasto-capillaire. Cet obstacle est surmonté en apposant une fibre d'élastomère souple à la fibre fonctionnelle. Cette stratégie de la fibre auxiliaire souple facilite l'enroulement en renforçant les forces capillaires sans pour autant augmenter significativement la rigidité à la

flexion globale de la fibre composite. Dans le cas de la goutte sur fibre simple, la dynamique d'enroulement et de déroulement est étudiée, et introduit une expérience originale pour l'étude de la dynamique de la ligne de contact.

L'élasto-capillarité assure une étirabilité unidimensionnelle aux fibres élastiques fines présentées. Cette stratégie est étendue aux structures bidimensionnelles en imbibant une fine membrane fibreuse d'un liquide mouillant. Lorsque les bords de cette membrane imbibée sont rapprochés, la membrane solide se plisse au sein du film liquide et reste ainsi globalement droite. L'étude expérimentale et théorique de ce matériau hybride liquide-solide révèle un comportement à la fois solide et liquide : le film liquide apporte une tension de surface tandis que la membrane fibreuse solide assure l'inextensibilité. Finalement, le motif de flambage dessiné par la membrane imbibée lorsqu'elle est comprimée est analysé et interprété par un modèle théorique.

**HERISSON Benjamin**, IRDL, Université de Bretagne Sud

*Directeurs de thèse* : Noël CHALLAMEL, Vincent PICANDET et Arnaud PERROT.

*Date soutenance* : 8 février 2018

**Titre : Endommagement discret et continu : application aux matériaux quasi-fragiles.**

Résumé: Dans cette thèse, des considérations fondamentales de modélisation des phénomènes de rupture sont abordées pour des systèmes discrets endommageables. Le but est d'établir, en commençant par des problèmes structuraux simples, un pont entre la Mécanique de l'Endommagement Discret (MED) et celle de la Mécanique de l'Endommagement Continu (MEC) non local. Il est actuellement admis que la MEC doit être considérée dans un cadre non local afin d'obtenir des résultats cohérents, notamment lors de la modélisation numérique de phénomènes de radoucissement basés sur des lois d'endommagement. Nous appuyons cette non-localité sur l'échelle de la microstructure du matériau. À l'aide d'une procédure de continualisation et l'utilisation de l'approximant de Padé, nous avons pu obtenir l'expression analytique de l'approximation continue non-locale offrant une représentation très fidèle du comportement du problème discret dans tout le processus d'endommagement. Nous étudions les systèmes de la chaîne axiale discrète en traction, de la poutre console discrète en flexion ainsi que de la membrane microstructurée sous pression uniforme. Le système discret est tout d'abord résolu puis les équations discrètes sont continualisées pour obtenir un modèle non local continu. Pour chacun de ces problèmes une attention toute particulière est portée aux conditions aux limites du problème continualisé, dont l'importance est illustrée tout au long de ce manuscrit.

**DIAMANTOPOULOU Evangelia**, Université de technologie de Troyes

*Directeurs de thèse* : Carl LABERGERE, Khemais SAANOUNI

*Date soutenance* : 13 février 2018

**Titre : Micromorphic Continua: Advances Multiphysic Modelling and Numerical Simulation of Metal Forming.**

Résumé: L'objectif de cette thèse est de démontrer l'efficacité des modèles de comportement élastoplastique fortement couplés à l'endommagement ductile isotrope dans le cadre des milieux micromorphes afin de s'affranchir de la dépendance au maillage lors de la prévision de l'amorçage et de la propagation de la rupture ductile. Cette approche repose sur (i) l'ajout de variables cinématiques micromorphes dans le principe des puissances virtuelles conduisant à de nouvelles équations de bilan ; (ii) l'ajout de nouveaux couples de variables d'état conduisant à de nouvelles équations de comportement ; (iii) une

discrétisation spatiale par éléments finis et temporelle par un schéma d'Euler avec un solveur global dynamique explicite et une intégration locale itérative implicite. Les aspects numériques associés sont implémentés dans ABAQUS®/Explicit. Deux éléments bilinéaires quadrangles à "déformation postulée" (2D déformation plane et axisymétrique) ont été développés afin d'introduire les nouvelles formes variationnelles. Les modèles sont validés avec une étude paramétrique pour étudier l'effet de chaque paramètre micromorphe et une méthodologie d'identification de la longueur interne micromorphe liée à l'endommagement micromorphe est proposée. Des essais de traction uniaxiale d'éprouvettes en acier inoxydable 430, des opérations de pliage et de découpage de tôles métalliques en DP1000 et DP600, sont simulées afin de valider la formulation proposée et montrer son efficacité à donner des solutions indépendantes du maillage par rapport au modèle local.

**BENDOUMA Mathieu**, IRDL, Université de Bretagne Sud

*Directeurs de thèse* : Patrick GLOUANNEC et Thibaut COLINART

*Date soutenance* : 22 février 2018

**Titre : Systèmes d'isolation thermique par l'extérieur : études expérimentales et numériques des transferts de chaleur et d'humidité**

*Résumé* : L'isolation thermique par l'extérieure (ITE) constitue une solution technique intéressante pour améliorer les performances énergétiques du secteur du bâtiment. Cependant, l'ITE peut venir modifier l'équilibre hygrothermique de l'enveloppe et affecter sa durabilité, notamment au regard de l'humidité. Dans ce contexte, un premier travail a consisté à étudier en laboratoire le comportement hygrothermique de trois systèmes d'ITE rapportés sur une paroi en parpaing : un système ETICS (PSE sous enduit mis en œuvre par voie humide) et deux systèmes sous bardage (mis en œuvre par voie sèche), dont un incluant des matériaux biosourcés (laine de bois et ouate de cellulose). Des expériences en enceinte biclimatique, combinées à des simulations numériques des transferts couplés de chaleur et de masse, ont permis d'appréhender le comportement hygrothermique de ces parois rénovées à différents stades : lors de la pose des solutions d'ITE, en usage « normal » et dans des conditions conduisant à des risques de condensation. Les résultats du système ETICS montrent le rôle important de la colle et la difficulté à appréhender numériquement son comportement. Les résultats des systèmes sous bardage soulignent l'intérêt d'utiliser des matériaux biosourcés dans des conditions à risques, mais également la sensibilité des simulations numériques aux propriétés hydriques des matériaux hygroscopiques. Un second travail portant sur l'analyse in situ d'un système d'ITE sous bardage a souligné l'absence de risques majeurs liés à l'humidité durant les deux années étudiées. Par ailleurs, la comparaison simulation/expérience a mis en évidence le rôle important joué par la lame d'air ventilée.

**QIANG Chen**, Mines ParisTech, Sophia Antipolis

*Directeurs de thèse* : Gildas Guillemot, Charles-André Gandin, Michel Bellet

*Date soutenance* : 10 avril 2018

**Titre : Thermomechanical numerical modeling of additive manufacturing by selective laser melting of powder bed – Application to ceramic materials**

*Résumé* : L'application du procédé SLM est limitée par la difficulté à contrôler le procédé. Son application aux céramiques est particulièrement difficile en raison de leur faible absorption au laser et de leur faible résistance au choc thermique. La maîtrise de ce procédé nécessite une compréhension complète du transfert de chaleur, de la dynamique des fluides

et de la mécanique des solides. Dans ce travail, nous proposons un modèle numérique pour la simulation du procédé SLM appliqué aux céramiques. Le modèle est développé à l'échelle du cordon et avec l'hypothèse d'un lit de poudre continu. Il est basé sur la méthode level set et l'homogénéisation multiphasique, avec laquelle nous sommes capables de suivre l'évolution de l'interface gaz/matière et les transformations de phase. La simulation développée permet d'étudier l'influence des propriétés du matériau et des paramètres du procédé sur la température, la forme du bain liquide, la dynamique des fluides et la mécanique des solides. En dehors de la puissance du laser et de la vitesse de balayage, l'absorption du matériau est également importante pour la thermique et la forme du bain liquide. Avec la dynamique des fluides, la forme convexe du cordon est obtenue sous tension de surface. Les gouttelettes liquides se forment lors de la fusion de la poudre et créent une instabilité du bain. Ceci entraîne une irrégularité du cordon après solidification. L'effet Marangoni, provoqué par le gradient surfacique de la tension de surface, est étudié. Son influence sur la répartition de la température, la forme du bain liquide et la régularité du cordon est évoquée. Cet effet peut lisser la surface du cordon avec  $\partial\gamma/\partial T$  négatif. En augmentant la vitesse de balayage, la surface du cordon devient plus irrégulière. L'effet de « balling » est reproduit avec une vitesse de balayage élevée. Cela peut être utile pour trouver le régime donnant une forme de cordon régulière étant données la puissance et la vitesse du laser. Le défaut de fissuration est délétère dans la fabrication additive. L'utilisation d'un laser auxiliaire peut aider à éviter ce défaut en diminuant la contrainte de traction maximale. Le mode de fonctionnement de ce laser auxiliaire reste un sujet intéressant à étudier et quelques pistes ont été données par les simulations présentées. Le modèle est validé par la comparaison de la forme du bain liquide avec des expériences dans différentes conditions de procédé. Les simulations peuvent également révéler la tendance de variation de la surface du cordon dans certains cas. Par la simulation de la déposition de cordons multiples, l'influence de taux de recouvrement sur la surface d'une couche, la température et l'évolution de contrainte est soulignée.

**NONY-DAVADIE Clément**, Arts et Métiers PartisTech Campus Metz

*Directeurs de thèse* : Fodil MERAGHNI, Yves CHEMISKY, George CHATZIGEORGIOU

*Date soutenance* : 20 avril 2018

**Titre : Modélisation multi-échelles de l'endommagement d'un composite à résine therm durcissable renforcé de fibres courtes de carbones**

*Résumé* : L'évolution du contexte industriel pousse l'industrie du transport, et plus particulièrement le secteur automobile, à réaliser des gains de masse. Ceci passe, pour partie, par le développement de nouvelles solutions en matériaux composites. Le présent travail de thèse est consacré à la caractérisation mécanique et à la modélisation micromécanique d'un nouveau matériau composite SMC renforcé de mèches de fibres de carbone. L'objectif est de constituer une première base de connaissances sur le comportement de ce SMC en fatigue. Les investigations expérimentales passent notamment par l'analyse de la microstructure, la caractérisation du comportement mécanique sous sollicitation quasi-statique et de fatigue ainsi que par l'analyse des modes de dégradations. L'approche multi-échelle développée prend en compte la microstructure du matériau aux deux échelles mises en évidence à travers deux homogénéisations successives par une méthode Mori-Tanaka. Cette stratégie de modélisation permet de relier le comportement des fibres et le comportement élasto-plastique de la matrice à travers une loi de comportement dédiée à celui du matériau composite, et enfin d'intégrer la distribution

d'orientation des mèches induites par le procédé de thermocompression. Le modèle multi-échelle a été identifiée par une méthode inverse à partir des bases de données expérimentales constituées lors des travaux. La loi constitutive globale, à l'échelle d'un volume élémentaire représentatif, a été implémentée dans la bibliothèque scientifique SMART+ en langage C++ et a été conçue pour être compatible dans le cadre d'analyse de structures par éléments finis. En régime nonlinéaire intégrant l'endommagement.

**LE PAVIC Jérémie**, IRDL, ENSTA Bretagne

*Directeurs de thèse* : David THÉVENET, Georgios STAMOULIS, Thomas BONNEMAINS

*Date soutenance* : 26 avril 2018

**Titre** : ***Développement d'une méthodologie de dimensionnement pour la conception d'assemblages collés pour application aérospatiale***

*Résumé* : Les lanceurs spatiaux sont des structures complexes associant une multitude de composants. L'assemblage de ces éléments doit répondre à un niveau de performance élevé. Le collage structural demeure un bon candidat en raison des nombreux avantages qu'il présente. Cependant, cette technologie montre des inconvénients. En raison des changements brusques de géométrie et de propriétés matériaux, des concentrations de contraintes apparaissent aux extrémités du joint de colle. Ce phénomène appelé effets de bords est néfaste pour la tenue mécanique de l'assemblage collé. La présence des effets de bords exclut l'utilisation de critères en contrainte utilisés classiquement.

Le dimensionnement d'assemblages collés requiert des outils fiables prenant en compte ces effets de bords. Dans cette étude, un modèle de ruine incrémentale, associant une approche en contrainte et en énergie, est utilisé. L'utilisation de cet outil dans un cadre industriel, impose de répondre aux besoins d'un Bureau d'Études, notamment en termes de coût de calculs. Afin de le diminuer, une implémentation semi-analytique, est tout d'abord développée. Puis, Une seconde méthode d'implémentation, basée sur la méthode des Éléments Finis, permet une prévision plus précise de la ruine d'un assemblage. La pertinence de ces deux approches a été vérifiée pour plusieurs configurations de joints collés. Des campagnes d'essais, destinées à confronter les résultats expérimentaux aux prévisions numériques, ont été réalisées. Dans le cadre de ce travail, un montage de collage et d'essai pour assemblages tubulaires a en particulier été développé.

L'objectif du pré-dimensionnement est d'identifier une zone d'intérêt dans l'ensemble du domaine d'étude. Aussi, une étude paramétrique peut être requise afin de réaliser cette tâche. Afin de réduire le coût de calcul, une méthode d'interpolation spatiale appelée Krigeage a été mise en œuvre, et permet la construction efficace d'une surface de réponse.

**POMAREDE Pascal**, ARTS ET METIERS ParisTech, Campus de METZ

*Directeurs de thèse* : Fodil MERAGHNI, Nico F. DECLERCQ

*Date soutenance* : 18 mai 2018

**Titre** : ***Damage detection in PA 66/6|Glass woven fabric composite material using ultrasonic techniques towards durability prediction of automotive parts***

*Résumé* : Ces travaux de thèse portent sur l'étude expérimentale approfondie d'un composite à base polyamide 66/6 renforcé par des fibres de verres tissées suivant un motif sergé 2/2. L'objectif est de proposer des solutions de Contrôle Non Destructif (CND) basées sur les ultrasons afin de détecter différents niveaux d'endommagement induit. Pour cela, une étude approfondie des mécanismes d'endommagement apparaissant lors de sollicitations en traction suivant l'axe des fibres et hors axes est réalisé. Le cas d'impact

induit par poids tombant est également étudié. En effet, ces différents cas de sollicitations entraînent l'apparition de différents mécanismes d'endommagement. Ces derniers, ainsi que leur ordre d'apparition, sont caractérisés par Microscopie Electronique à Balayage (MEB) et tomographie à rayons X principalement. L'évaluation de la réduction du module élastique pré et post chargement ainsi que la fraction volumique de vides montrent une évolution de l'endommagement plus importante lors de chargement en traction hors axes des fibres que lors de chargement suivant l'axe. Lors des essais d'impact par poids tombant, différents niveaux d'énergie sont considérés en restant proche du domaine des BVID en vue d'éprouver la sensibilité des méthodes de CND. Deux méthodes de CND par ultrasons étudiées durant ce projet peuvent être mises en avant. Premièrement, par mesure de la vitesse de propagation des ondes dans plusieurs directions du composite, le tenseur de rigidité est estimé dans tous ces cas de sollicitation mécanique pour différents niveaux d'endommagement. Des indicateurs d'endommagement basés sur ces mesures montrent une évolution de l'état d'endommagement similaire à celle discutée précédemment. Deuxièmement, une étude de la détection de l'endommagement par ondes guidées est menée. Aucun changement des modes transmis n'est visible lors de l'augmentation de l'état d'endommagement. L'évolution de l'énergie du signal transmis est alors proposée et validée comme indicateur d'endommagement efficace pour des chargements en traction mais pas pour l'impact. La mesure du décalage temporel a en revanche permis une localisation et une quantification de l'endommagement induit par impact.

**SARRE BENJAMIN**, Université de Technologie de Troyes

*Directeurs de thèse* : Benoît Panicaud

*Date soutenance* : 29 juin 2018

**Titre : Influence du soudage laser Nd :Yag sur les propriétés métallurgiques et mécaniques de l'alliage de titane TA6V**

*Résumé* : Le soudage est une opération consistant à assembler deux ou plusieurs pièces afin d'assurer la continuité d'une structure. L'assemblage ainsi formé peut supporter des efforts mécaniques, notamment des pressions dans le cadre de réservoirs. Toutefois, l'opération de soudage n'est pas sans conséquence pour le matériau cible. En effet, l'état métallurgique et mécanique de ce dernier est profondément affecté. Cette étude vise à une meilleure compréhension de l'influence du procédé de soudage sur l'état métallurgique et mécanique de l'alliage de titane TA6V. Dans un premier temps, l'état métallurgique de la liaison soudée a été caractérisé. Ces analyses ont mis en évidence un fort gradient de microstructure entre la zone fondue et le métal de base. Ces évolutions engendrent des contraintes résiduelles. Dans un deuxième temps, l'état mécanique post-soudage a été étudié expérimentalement à l'aide de la diffraction des rayons X. Pour cela, une campagne d'essais a été conduite à l'ESRF sur la ligne de lumière BM02. Les champs de contraintes déterminés expérimentalement ont été comparés à la prédiction d'un modèle de comportement mécanique multi-échelles. Les évolutions de microstructure sont également la source d'un gradient de propriétés mécaniques. Finalement, le comportement mécanique des liaisons soudées a été étudié. La zone fondue présente des caractéristiques mécaniques supérieures à celles du métal de base. Ce caractère entraîne une localisation de la déformation plastique dans le métal de base. La rupture intervient finalement au sein de ce dernier, malgré la présence importante de défauts dans la zone fondue. Les résultats ont été comparés à un modèle de comportement de type élastoplastique couplé au modèle de Gurson-TvergaardNeedleman.

Le modèle permet de restituer de façon très satisfaisante le comportement mécanique des liaisons soudées. Le soudage est une opération consistant à assembler deux ou plusieurs pièces afin d'assurer la continuité d'une structure. L'assemblage ainsi formé peut supporter des efforts mécaniques, notamment des pressions dans le cadre de réservoirs. Toutefois, l'opération de soudage n'est pas sans conséquence pour le matériau cible. En effet, l'état métallurgique et mécanique de ce dernier est profondément affecté. Cette étude vise à une meilleure compréhension de l'influence du procédé de soudage sur l'état métallurgique et mécanique de l'alliage de titane TA6V. Dans un premier temps, l'état métallurgique de la liaison soudée a été caractérisé. Ces analyses ont mis en évidence un fort gradient de microstructure entre la zone fondue et le métal de base. Ces évolutions engendrent des contraintes résiduelles. Dans un deuxième temps, l'état mécanique post-soudage a été étudié expérimentalement à l'aide de la diffraction des rayons X. Pour cela, une campagne d'essais a été conduite à l'ESRF sur la ligne de lumière BM02. Les champs de contraintes déterminés expérimentalement ont été comparés à la prédiction d'un modèle de comportement mécanique multi-échelles. Les évolutions de microstructure sont également la source d'un gradient de propriétés mécaniques. Finalement, le comportement mécanique des liaisons soudées a été étudié. La zone fondue présente des caractéristiques mécaniques supérieures à celles du métal de base. Ce caractère entraîne une localisation de la déformation plastique dans le métal de base. La rupture intervient finalement au sein de ce dernier, malgré la présence importante de défauts dans la zone fondue. Les résultats ont été comparés à un modèle de comportement de type élastoplastique couplé au modèle de Gurson-Tvergaard-Needleman. Le modèle permet de restituer de façon très satisfaisante le comportement mécanique des liaisons soudées.

**RAMARD Constant**, LMGC

*Directeurs de thèse* : Philippe PILVIN, Denis CARRON et Florent BRIDIER

*Date soutenance* : 24 août 2018

**Titre : Étude expérimentale et numérique du soudage multipasse : application à un acier de construction navale**

*Résumé* : Les travaux effectués au cours de cette thèse ont pour objectif d'étudier et de modéliser une opération de soudage multipasse d'un acier à haute limite d'élasticité utilisé en construction navale. Dans ce cadre il s'agit de prédire les conséquences métallurgiques et mécaniques du procédé et tout particulièrement la répartition et l'intensité des contraintes résiduelles postsoudage nécessaires pour analyser l'intégrité de la structure navale en service. Deux maquettes représentatives d'un joint d'angle en Té ont permis de caractériser l'évolution des cycles thermiques, de la microstructure et des contraintes résiduelles (estimées par les méthodes du contour et du trou profond) après chaque passe de soudage. La suite de l'étude concerne la caractérisation et la modélisation du comportement thermo-métallurgique et thermomécanique des différentes phases apparaissant au cours du soudage. La dernière partie porte sur l'implémentation des modèles retenus dans le code de calcul élément finis Abaqus à l'aide de sous-programmes spécifiques. Une étape de transition d'échelle a permis de décrire le comportement thermomécanique multiphasé de cet acier. Des calculs préliminaires ont été conduits pour valider l'implémentation des modèles sur des cas simples. Différents couplages ont été réalisés, soit une analyse thermique puis thermo-métallurgique, pour estimer la dureté après chaque passe et enfin métallurgique-mécanique pour prédire les contraintes résiduelles pour le procédé de

soudage multipasse. Les résultats des calculs éléments finis ont été discutés et comparés aux résultats expérimentaux obtenus dans la première partie de cette étude.

**THIEURMEL Ronan**, Mines Paristech

*Directeurs de thèse* : Jacques BESSON, Anne-Françoise GOURGUES

*Date soutenance* : 14 septembre 2018

**Titre : Identification des conditions de rupture fragile des gainages combustibles en alliage de zirconium oxydés sous vapeur d'eau à haute température et trempés sous charge axiale.**

Résumé :

Lors d'un scénario hypothétique d'Accident par Perte de Réfrigérant Primaire (APRP), les gainages combustibles en alliage de zirconium subissent des sollicitations thermomécaniques sévères dans des environnements chimiques très oxydants. L'évolution des conditions de pression et de température ainsi que la présence du fluide réfrigérant peuvent entraîner dans un premier temps le ballonnement-éclatement puis l'oxydation sous vapeur et la prise d'hydrogène à haute température ainsi que des chargements mécaniques axiaux lors du renoyage final. L'objectif de la thèse est d'identifier les mécanismes et les paramètres clés qui gouvernent la rupture lors de la phase de renoyage sous traction. Des essais semi-intégraux, visant à reproduire un scénario APRP sur des tronçons de gaines de Zircaloy-4, ont été réalisés afin d'étudier le comportement de ce matériau dans de telles conditions. Un seuil fonction de la durée d'oxydation à haute température, à partir duquel la gaine rompt lors du renoyage, est mis en évidence. Deux lieux de rupture sont identifiés : la zone ballonnée où l'oxydation est maximale et la prise d'hydrogène nulle, ainsi que la zone dite « d'hydruration secondaire », sous la zone ballonnée, où la prise d'hydrogène est conséquente et l'oxydation moindre. Par ailleurs, un scénario de la rupture par rapport à la chronologie du renoyage a été établi. Cependant, le traitement macroscopique de ces essais ne permet pas de discriminer ces deux lieux de rupture, car la rupture intervient indépendamment dans le ballon et hors zone ballonnée en fonction du transitoire appliqué et de la morphologie du ballonnement-éclatement. Une approche locale a été mise en place, à partir de la caractérisation microstructurale et fractographique systématique des éprouvettes d'essai, afin d'établir un critère de rupture dépendant de l'état du matériau. La distribution complexe des éléments chimiques et des phases dans l'épaisseur de la gaine a été déterminée. Les changements de phase dans le ballon fortement oxydé, menant à une microstructure globalement fragile, ont été explicités. Une loi de seuil à rupture, en zone d'hydruration secondaire, a été identifiée à l'aide des mesures d'épaisseurs de phases et du profil de teneur en hydrogène.

**LAFOURCADE Paul**, Arts et Métiers Paristech

*Directeurs de thèse* : Olivier CASTELNAU

*Date soutenance* : 19 septembre 2018

**Titre : Modélisation multiéchelle du comportement des matériaux énergétiques, application au TATB.**

*Résumé* : La conception de lois de comportement en science des matériaux n'est pas nouvelle. Cependant, le progrès constant en calcul haute performance change la donne. En effet, ces lois visent désormais à tenir compte de la microstructure et de la physique sous-jacente, à l'échelle atomique, pour laquelle les techniques de simulation sont précises mais très coûteuses. L'approche multiéchelle semble parfaitement adaptée à ces problématiques

et le dialogue entre échelles nécessaire. Dans cette thèse, le comportement mécanique du matériau énergétique TATB en température et en pression est étudié via des simulations de dynamique moléculaire afin de caractériser les mécanismes microscopiques responsable de son comportement irréversible. Le calcul local de variables mécaniques a été développé dans des simulations atomistiques, permettant le dialogue avec les méthodes continues. De plus, une méthode d'application de chemins de déformation a été couplée avec la dynamique moléculaire, menant à la caractérisation de la réponse mécanique très anisotrope du monocristal de TATB. Nucléation de dislocations au cœur complexe, chemin de transition pour le maillage et pseudo-transition de phase de type maillage-flambage sont trois comportements distincts associés à trois types de sollicitation dans différentes directions. Des simulations à l'échelle mésoscopique, alimentées par les données calculées à l'échelle microscopique, sont ensuite effectuées et visent à reproduire la pseudo-transition de phase sous compression triaxiale dans un code Lagrangien. La comparaison des résultats aux deux échelles est rendue possible par les outils de mécanique des milieux continus implémentés dans le code de dynamique moléculaire. Finalement, un polycristal de TATB est simulé en élasticité non linéaire et nous montrons l'importance de considérer une équation d'état compatible avec cette pseudo-transition de phase, qui semble avoir une forte influence sur le comportement du polycristal.

**WATRIN Jean-Charles**, LEM3

*Directeurs de thèse* : Mohammed NOUARI, Hamid MAKICH, Badis HADDAG

*Date soutenance* : 26 septembre 2018

**Titre : Caractérisation du comportement à l'endommagement des rotules de suspension automobile – Développement d'un outil d'aide à la conception et l'optimisation**

*Résumé* : L'allègement des véhicules automobiles imposés par des nouvelles réglementations remettent en question le choix des matériaux et des designs dans le développement des nouvelles pièces mécaniques dans l'industrie automobile. Pour les rotules de suspension, cet allègement a pour conséquence l'augmentation de l'intensité du chargement subi par ces organes qui assurent la stabilité du véhicule et sa tenue sous différentes conditions de roulage : virage, freinage brusque, franchissement d'obstacles, etc.. Sous un chargement intense, des phénomènes d'endommagement d'origines mécanique, thermique et tribologique peuvent apparaître dans le contact conforme de la rotule. La caractérisation et la modélisation de ces phénomènes en fonction du chargement incident ont particulièrement été abordées dans ce travail de thèse. Des essais d'endommagement ont été réalisés sur des rotules automobiles fournies par le partenaire industriel VT2i afin d'appréhender l'influence des sollicitations intenses et répétées sur la dégradation de la fonction rotule d'un véhicule. La reproduction de ces phénomènes sur des éprouvettes ont permis d'identifier les lois de comportement des matériaux constituant la rotule et de définir leur fonctionnement optimal selon les cahiers des charges établis par les clients de VT2i. Une modélisation de l'endommagement du contact pivot-coussinet de la rotule a été proposée et confrontée aux résultats d'essais expérimentaux. La bonne adéquation des résultats de la modélisation avec ceux des essais montre la pertinence de la démarche adoptée. Cette dernière consiste à (i)- analyser la cinématique de la rotule de suspension en fonction du chargement imposé, (ii)- identifier l'évolution du champ de contraintes pendant les phases de roulage, (iii)- calculer le champ de glissements dans le contact et enfin (iv)- évaluer la contribution des différents modes d'endommagement dans la dégradation totale de la rotule. La modélisation a permis de mettre en place un outil

d'aide à l'optimisation du contact pivot-coussinet de la rotule et la conception de nouvelles géométries répondant aux contraintes techniques sévères du marché pour notre partenaire industriel.

**PRAUD Francis**, Arts et Métiers ParisTech - Metz

*Directeurs de thèse* : Fodil Meraghni, George Chatzigeorgiou

*Date soutenance* : 19 avril 2018

**Titre : Multi-scale modelling of thermoplastic-based woven composites, cyclic and time-dependent behavior**

*Résumé* : Dans ce travail de thèse, une modélisation multi-échelle est mise en place à partir du concept d'homogénéisation périodique pour étudier le comportement cyclique et dépendant du temps des composites tissés à matrice thermoplastique. Avec l'approche proposée, le comportement macroscopique du composite est déterminé à partir d'une simulation éléments finis effectuée sur une cellule unitaire représentative de la microstructure périodique, où les lois de comportement des constituants sont directement intégrées, à savoir: la matrice et les torons. La réponse locale de la matrice est décrite par une loi de comportement phénoménologique multimécanismes intégrant viscoélasticité, viscoplasticité et endommagement ductile. Pour les torons, une loi de comportement hybride micromécanique-phénoménologique est considérée. Cette dernière prend en compte l'endommagement anisotrope et l'anélasticité induite par la présence d'un réseau diffus de microfissures à travers une description micromécanique d'un volume élémentaire représentatif contenant des microfissures. Les capacités du modèle multi-échelles sont validées en comparant les prédictions numériques aux essais expérimentaux. Les capacités du modèle sont également illustrées à travers plusieurs exemples où le composite subit des déformations dépendantes du temps lors de chargements monotones, de chargements à amplitude constante ou cyclique et encore lors de chargement multiaxiaux non proportionnels. En outre, le modèle multi-échelle est aussi utilisé pour analyser l'influence des mécanismes de déformation locaux sur la réponse macroscopique du composite.