

# COLLOQUE DES DOCTORANTS

14 Mai 2009

École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne



**L**aboratoire de  
**T**ribologie et  
**D**ynamique des  
**S**ystèmes

## Une thèse au LTDS...

Si l'on se réfère à l'étymologie, le docteur est un "sage" qui détient un savoir et qui l'enseigne. En corollaire, le doctorant ne serait donc qu'un disciple que son tuteur guide sur la voie tortueuse de la quête du savoir. Cette seule analyse étymologique qui limiterait la thèse à un parcours initiatique vers la connaissance est évidemment très réductrice car ni le doctorant, ni celui qui l'accompagne ne connaissent ce qu'il y a réellement au bout du chemin et chacun a le devoir d'apprendre de l'autre. Ainsi, la relation maître/disciple au sens où l'entendaient les philosophes grecs unissant le doctorant à son directeur de thèse demeure l'élément fondamental dans l'épilogue plus ou moins heureux d'un travail de thèse. Cette route vers l'inconnu, jalonnée de doutes, de remises en question, de joies et de déceptions est certainement ce qui forme l'esprit bien plus que l'acquisition de nouvelles connaissances et de compétences scientifiques.

"Faire une thèse" c'est s'aventurer dans des voies inexplorées et par conséquent développer sa curiosité et son discernement pour appréhender un monde où le surplus d'informations devenues produits de consommation sclérose l'envie d'apprendre. C'est aussi, dans une société où tout s'accélère, le luxe de prendre du temps pour réfléchir, approfondir un sujet (signification de la racine grecque du mot "thèse") et en apprivoiser la complexité. C'est, pour résumer, faire preuve d'audace, de tolérance, de patience et d'humilité, qualités indispensables pour exprimer sa créativité.

Le LTDS est désormais une entité tentaculaire, multi-site, multi-disciplinaire qui couvre un champ scientifique allant de la tribologie, à la dynamique non-linéaire et à la vibro-acoustique en passant par la mécanique, la physico-chimie des surfaces et le génie civil. Même si cette diversité apparaît souvent comme une richesse, elle peut devenir un facteur de décohésion en l'absence de liens entre tous ses éléments de différenciation. C'est pourquoi, la tenue d'un colloque des doctorants est une respiration importante dans la vie de notre laboratoire qui permet à chacun d'élargir son point de vue et à tous d'apprendre à l'écoute de la différence de l'autre. Le succès de l'édition 2008 a fait de ce séminaire un événement récurrent qui montre le dynamisme de notre recherche dont les doctorants sont un des moteurs.

Comme pour toute entreprise collective, la réussite de ces journées n'est possible que grâce au dévouement de quelques individualités réunies dans une équipe d'une remarquable efficacité. Merci donc à Olga, Eric, Stéphane, Younes et Sébastien.

Denis Mazuyer, Directeur du LTDS,  
Le 3 Mai 2009

# DÉROULEMENT DE LA JOURNÉE

13h45 : INTRODUCTION :

## SESSION 1 : MATÉRIAUX COMPOSITES ET POLYMÈRES

Chairman : Frédéric Gillot

- 14h00 : Svetlana Therekina, Comportement à long terme de polymères et de composite soumis à des sollicitations de fretting
- 14h20 : Nicolas Roche, Matériaux et structures à base de poudrettes de pneumatiques à hautes performances vibroacoustiques

## SESSION 2 : MODÉLISATION ET MÉTHODES NUMÉRIQUES

Chairman :

- 14h40 : Mohamed Chabchoub, Élaboration de modèle de pré-conception acoustique : approches directe et inverse
- 15h00 : Thomas Heuze, Modélisation des couplages fluide/solide dans les procédés d'assemblage à haute température
- 15h20 : Guillaume Pacquaut, Modélisation numérique des frontières mobiles dans le cas du transport et de la diffusion au cours des procédés d'élaboration directe

## PAUSE CAFÉ

## SESSION 3 : FATIGUE, RUPTURE ET ENDOMMAGEMENT

Chairman : Bruno Berthel

- 16h00 : Loïc Salles, Modélisation de l'usure par fretting sous sollicitations dynamiques dans l'interaction aube/disque
- 16h20 : Rémi Amargier, Étude de l'amorçage de fissure en fretting
- 16h40 : Thomas Schmitt, Rôle du silicium dans l'amélioration de la résistance à l'usure et à l'oxydation de revêtements nanostructurés à base CrN

# COMPORTEMENT À LONG TERME DE POLYMÈRES ET DE COMPOSITE SOUMIS À DES SOLLICITATIONS DE FRETTING

Svetlana Terekhina (svetlana.terekhina@ec-lyon.fr)

Directeur de thèse : Michelle Salvia

---

Les vibrations induites lors de la fabrication de structures polymères ou composites peuvent générer des sollicitations, appelées fretting, qui sont à l'origine d'endommagement spécifiques (usure, fissuration...) conduisant à une rupture de la pièce.

L'objet du présent travail est d'étudier l'influence des sollicitations sous petits débattements sur le comportement mécanique de deux types de polymères thermodurcissables : résines époxyde RTM6 et polybismaléimide BMI ainsi que le composite HexTOOL à base de matrice polybismaléimide renforcé par des fibres de carbone. L'enjeu est de relier le comportement viscoélastique de ces polymères à leurs comportements tribologiques en fonction de la température pour comprendre et maîtriser le dommage induit par les sollicitations de fretting.

D'une part, des analyses par spectrométrie mécanique (DMA) ont été réalisées afin de caractériser le comportement viscoélastique des polymères et du composite soumis à une sollicitation thermomécanique. D'autre part, des essais de fretting ont été menés en adoptant une géométrie de contact sphère/plan. L'essai consiste à imposer un déplacement relatif  $D$  et un effort normal  $FN$  entre les deux antagonistes. Les cycles  $Ft - D$  sont représentés en fonction du nombre de cycles sur un tracé tridimensionnel FDN appelé « bûche de fretting ». Les informations transcrites sur la bûche sont à l'origine de cartes de sollicitations locale (CSL) qui permettent de visualiser différents régimes de fretting (partiel, mixte, glissement total) et de relier les sollicitations dans l'aire de contact aux conditions de chargement extérieur. Une approche énergétique de l'usure a été développée. L'influence des propriétés viscoélastiques des polymères et de différentes orientations de fibres dans le composite HexTOOL sur la cinétique d'usure a été montrée.

Objectifs scientifiques : Étudier l'influence des sollicitations sous petits débattements sur le comportement mécanique des polymères thermodurcissables ainsi que des composites.

Objectifs industriels : Meilleure compréhension des mécanismes d'usure en fretting pour évaluer la durée de vie des pièces lors de leurs fabrications.

Mots clés : fretting, DMA, RTM6, BMI, HexTOOL

# MATÉRIAUX ET STRUCTURES À BASE DE POUDRETTES DE PNEUMATIQUES À HAUTES PERFORMANCES VIBROACOUSTIQUES

Nicolas Roche (nicolas.roche@ec-lyon.fr)  
Directeur de thèse : Mohamed Ichchou

Le recyclage des pneumatiques présente des avantages autant sur le plan économique qu'environnemental mais présente quelques difficultés dans la mesure où le caoutchouc présent dans la gomme est sous forme vulcanisé (réseau 3D réticulé), et donc non thermofusible comme un thermoplastique commun. Une des méthodes présentant le plus d'intérêt consiste à incorporer des poudrettes de pneumatiques recyclés GTR (Ground Tire Rubber) dans une matrice thermoplastique, modifiant ainsi ses propriétés.

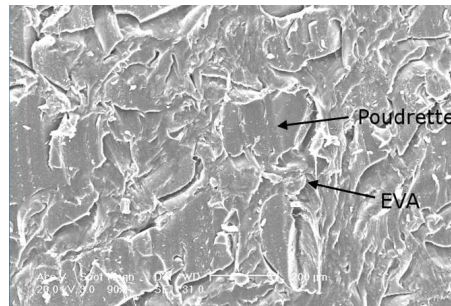
Notre étude a pour objectif d'évaluer les performances de ce type de matériau en s'intéressant à l'amortissement acoustique et vibratoire, à la résistance à l'impact, ainsi qu'aux mécanismes de déformations mis en jeu.

La première partie de mon travail a été consacrée à l'étude expérimentale des propriétés dynamiques d'une matrice thermoplastique (EVA) mélangée à des poudrettes de pneu recyclé (GTR). Les propriétés mécaniques dynamiques des échantillons ont été caractérisées par DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analyzer) où en appliquant le principe d'équivalence Température/Fréquence (WLF) on peut extrapoler les résultats dynamiques sur une plus large bande de fréquence.

On évalue l'énergie dissipée, et donc de l'amortissement, grâce au facteur de perte  $\eta = \frac{E''}{E'}$  et l'on s'intéresse plus particulièrement aux vibrations dans la gamme de fréquence 1-2000Hz où l'amortissement acoustique et vibratoire est le plus problématique. Grâce à cette méthode on accède aussi à l'énergie d'activation apparente de la relaxation mécanique principale, indice de la mobilité moléculaire des chaînes polymères qui pourrait jouer un rôle important en terme de dissipation visqueuse d'énergie vibratoire. Le comportement au choc est étudié à l'aide d'un essai type "chute de masse".

La deuxième étape consistera en l'élaboration de composites PP-poudrettes pour un éventuel transfert vers l'industrie automobile, dans le but de réduire le bruit et les vibrations dans l'habitacle.

On s'intéressera aussi la conception et aux performances de structures (sandwich, NIDA, stratifié multicouches) à bases de poudrettes ou de composites chargés en poudrettes.



## Objectifs scientifiques :

- Comprendre les mécanismes d'amortissement visqueux des matériaux chargés en poudrettes en fonction du type de sollicitation (vibration, choc, acoustique) et l'influence de l'interface matrice/poudrettes sur les performances dynamiques.
- Evaluer l'influence de la dévulcanisation partielle des poudrettes sur les propriétés morphologiques et dynamiques des matériaux.

## Objectifs industriels :

- Evaluer l'influence des paramètres de conception pour différents types de procédés (Extrusion, Injection, Compression) sur les performances afin d'aboutir aux propriétés désirées du matériau.
- Valoriser l'aspect écologique de notre travail :
  - Employer des méthodes nécessitant peu d'énergie
  - Adapter nos procédés de manière à utiliser du matériel déjà présent en plasturgie
  - Veiller à ne pas utiliser d'additifs chimiques ou d'autres procédés potentiellement nocifs pour l'environnement
- Remplacer des polymères utilisés dans l'industrie par des composites thermoplastiques/poudrettes à performance équivalente pour un moindre coût.

Mots clés : élastomère, poudrettes pneumatique recyclée, WLF, DMA

# ELABORATION DE MODÈLE DE PRÉ-CONCEPTION ACOUSTIQUE : APPROCHES DIRECTE ET INVERSE

Mohamed Chabchoub (mohamed.chabchoub@ec-lyon.fr)

*Directeur de thèse : Mohamed Ichchou*

---

Dans le domaine des moyennes et hautes fréquences, des méthodes numériques bien étudiées comme la méthode des éléments finis FEM et la méthode des éléments de frontière BEM présentent des limites lorsqu'on augmente la fréquence et les méthodes inverses posent souvent des problèmes liés à la taille des calculs effectués ou au conditionnement des matrices à inverser. Pour palier ce type de problèmes, nous nous proposons ici d'étudier une méthode énergétique simplifiée (MES) qui présente la particularité d'être avantageusement inversible. La MES peut être appliquée dans le cas 2D (plaque) ou 3D (cavité) pour déterminer les densités d'énergie. La thèse a pour but d'utiliser cette méthode énergétique pour résoudre les problèmes inverses.

Objectifs scientifiques : Identification des sources acoustiques pour les cas 2D et 3D. Localisation de ces sources et quantification de leur niveau.

Objectifs industriels : Détection des sources de bruit (aéronautique et automobile). Amélioration du confort acoustique.

Mots clés : méthode inverse, méthode énergétique simplifiée MES, moyennes et hautes fréquences, densité d'énergie

# MODÉLISATION DES COUPLAGES FLUIDE/SOLIDE DANS LES PROCÉDÉS D'ASSEMBLAGE À HAUTE TEMPÉRATURE

Thomas Heuze (thomas.heuze@etu.upmc.fr)  
*Directeur de thèse : Jean-Michel Bergheau*

---

Le procédé de soudage ponctuel par friction et malaxage fait intervenir de grandes déformations au voisinage de l'outil. La simulation de ce procédé doit rendre compte d'une phase pâteuse dans laquelle la matière est malaxée, et d'une phase demeurant solide. Une approche de type eulérienne lagrangienne arbitraire combinée à des comportements respectivement fluide et solide dans chacune de ces phases peut permettre de simuler de nombreux tours de l'outil dans la matière tout en suivant les bords des tôles. Le travail présenté ici se focalise sur une première étape de cette étude, le développement d'une formulation mixte température/vitesse/pression d'un élément fini fluide P1+/P1 dans le cas instationnaire.

Objectifs scientifiques : Intégrer la modélisation d'une zone fondue/pâteuse dans la simulation d'un procédé de soudage

Mots clés : Élément fini P1+/P1, Friction Stir Spot Welding, Instationnarité,

# MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES FRONTIÈRES MOBILES DANS LE CAS DU TRANSPORT ET DE LA DIFFUSION AU COURS DES PROCÉDÉS D'ÉLABORATION DIRECTE

Guillaume Pacquaut (pacquaut@emse.fr)  
Directeur de thèse : Drapier / Bruchon

Le but de ce travail est de simuler numériquement les procédés d'élaboration par infusion de résine en utilisant la méthode des éléments finis. Ces procédés dits par « voie sèche » sont utilisés pour élaborer des matériaux composites à matrice organique. Ils peuvent se modéliser schématiquement de la façon suivante : un moule contient initialement de la résine (une partie purement fluide) et des préformes (un milieu poreux). Sous l'effet d'une pression mécanique extérieure, appliquée sur l'ensemble résine+préformes, la résine infuse dans les préformes, elles-mêmes sujettes à de grandes déformations induites par la compaction de l'ensemble.

La présentation portera sur la modélisation et la simulation du couplage de l'écoulement dans une zone purement fluide, décrit par les équations de Stokes, et de l'écoulement dans un milieu poreux, décrit par les équations de Darcy. L'approche adoptée ici est donc une approche macroscopique. Contrairement aux travaux précédents, l'interface entre le milieu purement fluide et le milieu poreux est décrite de manière Eulérienne, via l'utilisation d'une méthode Level Set. Elle est représentée par la ligne de niveau zéro d'une fonction régulière (fonction distance) et traverse donc les éléments du maillage.

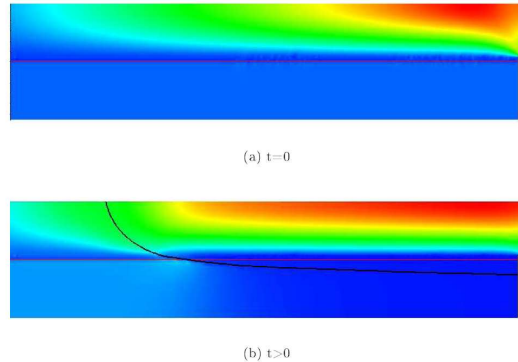
Concernant la résolution du problème couplé, l'ensemble du domaine de calcul (Stokes + Darcy) est discrétisé à l'aide d'un maillage non structuré, constitué en 2D de triangles et en 3D de tétraèdres. Nous utilisons une formulation mixte en vitesse-pression définie sur tout le domaine. Dans Stokes, nous utilisons l'élément P1+/P1. Dans Darcy, cet élément n'étant pas stable pour la formulation utilisée, nous adoptons une formulation P1/P1 stabilisée à l'aide d'une formulation multi-échelles.

Je présente donc ici la formulation implémentée ainsi qu'une validation de cette formulation grâce à une solution analytique établie pour des cas simplifiés. D'autres simulations sont également présentées, se rapprochant progressivement d'un cas réel d'infusion.

Objectifs scientifiques : Simuler numériquement les procédés d'élaboration par infusion de résine en utilisant la méthode des éléments finis.

Objectifs industriels : Améliorer la compréhension des procédés d'élaboration par infusion de résine.

Mots clés : Infusion, couplage Stokes-Darcy, Level-set, Éléments finis



*Simulation sous ZéBuLoN du procédé d'infusion de résine (la ligne rouge correspond à l'interface entre le milieu purement fluide (haut) et le milieu poreux (bas) et la ligne noire correspond au front fluide)*

# MODÉLISATION DE L'USURE PAR FRETTING SOUS SOLLICITATIONS DYNAMIQUES DANS L'INTERACTION AUBE/DISQUE

Loïc Salles (loic.salles@ec-lyon.fr)

Directeur de thèse : *Fabrice Thouverez et Alexander Gouskov*

Partenariat industriel : Snecma

---

Les parties tournantes des turbomachines aéronautiques sont composées d'une succession de roues aubagées qui permettent le transfert de l'énergie entre l'air et le rotor. Ces roues aubagées constituent des pièces particulièrement sensibles car elles doivent répondre en termes de dimensionnement à des impératifs de performances aérodynamiques, d'aéroacoustique et de tenue mécanique à la rotation, la température et la charge aérodynamique. Lors de l'accélération et la décélération du moteur un micro-glissement se produit en pied d'aube qui entraîne un phénomène de fretting-wear. Ce phénomène est étudié numériquement et expérimentalement au LTDS. Ces études ne permettent pas de retrouver l'usure observée sur les moteurs de la flotte SNECMA.

Dans le cadre de notre étude nous nous intéressons au couplage entre la réponse vibratoire de la roue aubagée et l'évolution de l'usure en pieds d'aubes. La réponse vibratoire est calculée par un algorithme basé sur la méthode des éléments finis et de condensation dynamique. Les non-linéarités dues au frottement existant au niveau des attaches aube-disque sont calculées par la méthode des Lagrangiens Dynamiques et par une procédure alternant un calcul fréquentiel et temporel. L'usure est calculée par la loi d'Archard. Elle intervient comme un jeu initial sur chaque nœud en contact, dont la valeur reste constante sur chaque cycle de fretting. Le temps est divisé en deux : une micro-échelle liée à la dynamique et une macro-échelle liée à l'usure. Les simulations montrent un effet de l'usure sur la dynamique et l'apparition après un certain nombre de cycles d'un état stationnaire que l'on cherche à calculer directement numériquement par des méthodes d'optimisations et d'études asymptotiques.

Objectifs scientifiques : Mise en place d'une première méthode numérique de prévision de l'usure des attaches sous chargements combinés statiques et dynamiques Etude du couplage entre fretting-wear et vibration.

Objectifs industriels : Programme permettant de prédire la réponse vibratoire avec dissipation par frottement aux interfaces et l'usure de ces interfaces

Mots clés : Fretting-wear, Vibration, Éléments Finis, Équilibrage Harmonique

## ÉTUDE DE L'AMORÇAGE DE FISSURE EN FRETTING

Rémi Amargier (remi.amargier@ec-lyon.fr)

Directeur de thèse : Siegfried Fouvry

Partenariat industriel : Airbus

---

Les critères de fatigue multiaxiale (Dang Van, Papadopoulos, ...) permettent aujourd'hui une prédiction efficace de la limite d'endurance d'éprouvettes lisses soumises à des chargements multiaxiaux. Néanmoins, ces critères locaux se limitent à des états de contraintes dénués de gradient de contraintes. Or les géométries industrielles génèrent souvent des gradients de contraintes et on observe expérimentalement (éprouvettes entaillées testées en traction ondulée, éprouvettes lisses en flexion) que les gradients de contraintes ont un effet bénéfique sur la tenue en fatigue.

Plusieurs méthodes ont été proposées pour prendre en compte l'effet de gradient de contraintes sur la durée de vie des éprouvettes. On peut citer par exemple, les méthodes de type distance critique, l'utilisation de fonction de poids, ou les méthodes de « moyennation ». Ces méthodes permettent une bonne prédiction de l'amorçage de fissures, mais sont souvent fortement dépendantes de la géométrie testée.

Dans ce projet, on s'intéresse donc à évaluer l'effet du gradient de contraintes sur le nombre de cycles à amorçage de fissures en vue d'établir un critère d'amorçage de fissures en fatigue multiaxiale prenant en compte l'effet du gradient de contrainte. Pour cela, on réalise des essais de fretting dans une configuration cylindre/plan. Ces essais permettent d'identifier différents seuils d'amorçage de fissures pour différents niveaux de chargements. Ces seuils d'amorçage sont ensuite utilisés pour étudier différents critères non locaux de fatigue multiaxiale. Les formulations s'appuient principalement sur le critère local de Papadopoulos dont la valeur moyenne est calculée sur une zone associée à la zone endommagée. Plusieurs formulations sont proposées pour définir cette zone endommagée afin d'obtenir des prédictions correspondant au mieux aux résultats expérimentaux. Les modèles seront ensuite testés sur une configuration représentative d'une application industrielle.

Objectifs scientifiques : Évaluer l'effet des gradients de contraintes sur l'amorçage de fissures en fatigue.

Objectifs industriels : Proposer un outil de dimensionnement en fatigue.

Mots clés : Fatigue multiaxiale, Fretting, Gradient de contrainte,

# RÔLE DU SILICIUM DANS L'AMÉLIORATION DE LA RÉSISTANCE À L'USURE ET À L'OXYDATION DE REVÊTEMENTS NANOSTRUCTURÉS À BASE CrN

Thomas Schmitt (thomas.schmitt@ec-lyon.fr)

Directeur de thèse : Julien Fontaine

---

Les revêtements durs de structure nano-échelle sont désormais bien connus pour leur résistance vis-à-vis de l'usure. Dans le cas de l'usinage sévère, une bonne stabilité des propriétés s'impose, que seuls les nouveaux revêtements type CrAlSiN peuvent endurer. Néanmoins, face à un tel composé quaternaire il est difficile de discriminer l'influence de chaque élément d'addition (Si et Al), si bien que nous proposons pour cette présentation d'étudier le rôle du silicium en particulier.

Les dépôts CrN et CrSiN sont réalisés par PVD à arc cathodique grâce à des cibles de chrome pur et binaires Cr-Si spécialement conçues, de teneur en Si variable depuis 3 à 12 at.. Les paramètres de dépôt ont tout d'abord été déterminés pour obtenir une couche CrN optimisée en termes de dureté, de résistance à l'usure et à l'oxydation. Ces conditions ont ensuite été transférées pour l'élaboration des dépôts ternaires CrSiN étudiés. La morphologie, la nature et la structure des couches sont déterminées par MEB, MET, DRX et EDS. Le comportement en oxydation sous air est déterminé par des analyses thermogravimétriques en conditions isotherme et dynamique jusqu'à 850°C. Le comportement tribologique est quant à lui étudié grâce à un tribomètre alternatif utilisé à température ambiante et à 300°C pour combiner au frottement "simple" une composante d'oxydation. Pour accentuer l'usure du film et afin de rendre compte des conditions sévères d'usinage, le revêtement est appliqué sur la bille et non sur le plan, de telle manière qu'il soit ainsi en permanence en contact.

Pour tous les revêtements réalisés, CrN est la seule phase détectée. L'analyse chimique montre que la quantité de silicium dans les couches est significativement plus faible que dans les cibles d'origine. La structure obtenue est très fine et présente une taille de grains estimée entre 5 et 15 nm. L'évolution des propriétés fonctionnelles est ensuite discutée en fonction de la structuration nanométrique du film.

Mots clés : PVD, revêtements nanostructurés, usure, oxydation

L'équipe organisatrice remercie les participants  
à cette édition 2009 du colloque des doctorants du LTDS  
ainsi que toutes les personnes ayant participé  
à son bon déroulement.

Olga Klinkova  
Stéphane Hérédia  
Younes Kadmiri  
Éric Feulvarch  
Sébastien Besset