

Habilitations à diriger des recherches

KRUCH Serge, ONERA

Date soutenance : 9 mai 2007

Titre : Modélisation du comportement et de la durée de vie de matériaux métalliques et composites : Application au calcul de structures

Résumé : Les travaux présentés dans ce mémoire concernent l'analyse de la durée de vie de structures métalliques et composites et déclinent toutes les étapes (pratiquées à l'Onera) nécessaires à la prévision du nombre de cycles à rupture et à la localisation de l'amorçage d'une fissure. Ces étapes se décomposent en trois : l'écriture de lois de comportement non linéaires, le calcul de structure, l'amorçage de fissure.

Une étape supplémentaire peut suivre cette dernière si l'on souhaite faire propager la fissure dans la structure afin d'analyser son trajet et sa nocivité. Les applications visées concernent essentiellement des composants du secteur aéronautique comme les disques de turbines (métalliques ou renforcés par des composites unidirectionnels à matrice métallique), les arbres de turbines basse pression ou les trains d'atterrissage. Pour déterminer les lois de comportement nous avons exploré d'une part, les voies permettant de résoudre le problème numérique de la localisation des déformations quand le comportement est couplé à de l'endommagement (endommagement fragile ou endommagement de fatigue) et, d'autre part, les approches multiéchelles permettant de mieux prendre en compte certaines caractéristiques microstructurales, en particulier pour les matériaux composites à matrice métalliques. Ce dernier point est traité en détail dans le cadre de l'homogénéisation des milieux périodiques en élasto-plasticité. Le but d'une telle approche est de construire une loi de comportement macroscopique permettant de réaliser des calculs de structures et, inversement, d'utiliser des techniques de relocalisation pour calculer les champs locaux à partir des champs macroscopiques. Les situations défavorables à de tels passages sont examinées, comme par exemple les structures à gros grain (mettant en défaut la notion de séparation des échelles) et les effets de bord (bords libres ou zones de transitions entre matériaux) où la périodicité n'est plus assurée. L'analyse de l'amorçage de fissures est réalisée à l'aide de modèles d'endommagement de fatigue/ fluage utilisés en post-traitement du calcul de structure cyclique après stabilisation du comportement. Les modèles d'endommagement développés à l'Onera pour les matériaux métalliques ont été étendus aux matériaux composites unidirectionnels à matrice métallique avec la prise en compte de l'anisotropie du comportement. La particularité de ces modèles est de permettre de prendre en compte, entre autres, les chargements multiaxiaux anisothermes, les effets de la contrainte moyenne sur la durée de vie, un cumul non linéaire de l'endommagement,.... Aujourd'hui le dimensionnement des disques de turbines ne tolère aucune fissure et leur durée de vie est donnée par le nombre de cycles nécessaires à l'apparition d'une fissure macroscopique. Cependant, il peut s'avérer utile de s'intéresser à la propagation de celle-ci ne serait-ce que pour avoir des indications sur son trajet (fissure débouchante, traversante, ...) et sa nocivité par rapport à un nombre de cycles potentiels avant rupture. Dans ce but un modèle de propagation de fissure, basé sur la Mécanique Linéaire de la Rupture, a été développé pour les alliages issus de la métallurgie des poudres et étendu à d'autres matériaux métalliques, capable de prendre en compte les interactions de fatigue/fluage/oxydation pour des chargements anisothermes. Tous ces modèles et outils numériques développés ces dernières années permettent aujourd'hui de réaliser une analyse fine du comportement et de la durée de vie de structures complexes tant par leur géométrie que par leur microstructure.

NADOT Yves, ENSMA Poitiers

Date soutenance : 5 juillet 2007

Titre : Tolérance aux défauts dans les métaux soumis à des sollicitations cycliques multiaxiales

Résumé : Le travail aborde le problème de l'influence des défauts de type fonderie sur la tenue en fatigue de pièces métalliques. Les défauts étudiés ont une taille supérieure au paramètre microstructurale caractéristique du matériau (taille de grain par exemple). Dans la mesure du possible, l'objectif est d'aborder le problème dans un cas général de géométrie, de taille, de type et de position de défaut. Les matériaux étudiés sont des alliages de fonderie ou des aciers contenant des défauts artificiels et ils sont soumis à des chargements multiaxiaux proportionnels d'amplitude constante. Le sujet est traité avec le souci constant de proposer des outils utilisables en contexte industriel. Une démarche de type 'technologique' est envisagée avec comme élément de base une étude expérimentale qui a pour but de dégager les principaux paramètres à prendre en compte pour décrire le matériau et ses défauts. Le domaine de durée de vie exploré est celui de la fatigue à grand nombre de cycles : au-delà de 100 000 cycles. Dans la mesure du possible, l'analyse sur pièce industrielle prend en compte la présence des contraintes résiduelles qui sont présentes dans les composants étudiés. Trois matériaux sont testés : une fonte GS ferritique, un acier de construction ferrito perlitique (C 35) et un acier pour liaison au sol. Notre objectif est de proposer un outil qui pourra intégrer la position, la géométrie, la taille et le type de défaut dans un critère de fatigue multiaxial. La démarche adoptée comporte deux parties.

La première présente des résultats expérimentaux obtenus sur une fonte GS contenant des retassures (en surface et à cœur). L'analyse des mécanismes d'endommagement par fatigue sur défaut naturel est assez difficile dans la mesure où la position du défaut n'est pas connue sur l'éprouvette. Des techniques de suivi de l'histoire de l'endommagement sont présentées. Il est utile de compléter ces résultats par une analyse des mécanismes sur un acier ferrito perlitique (C35) contenant des défauts artificiels contrôlés.

La deuxième partie présente notre proposition de modélisation du défaut. Une première approche empirique est appliquée dans le cas de bras de liaison au sol en fonte GS. Le modèle pour prendre en compte les défauts est ensuite exposé puis validé pour les différents matériaux testés. Ce modèle est utilisable dans la plupart des critères de fatigue usuels, nous le présenterons appliqué au critère de Croosland. Un effort est réalisé pour valider la proposition pour des géométries de défauts assez différentes mais aussi pour des cas de chargements multiaxiaux incluant des contraintes moyennes. Cette partie se termine par l'application de la méthode proposée à un composant industriel automobile. Enfin nous tenterons de porter un regard critique sur la méthode proposée afin d'en évaluer les forces et les faiblesses tant d'un point de vue fondamental que d'un point de vue applicatif. Il convient en effet de bien borner le domaine d'application en terme de population de défaut (type, position et taille), chargement et application.

PEREZ Michel, INSA Lyon

Date soutenance : 15 octobre 2007

Titre : Approche multi-échelle de la précipitation

Résumé : La précipitation de phases durcissantes dans les alliages métalliques est une préoccupation industrielle et scientifique majeure. En effet, l'ajout de quelques éléments d'alliages, même en faible quantité, peut changer radicalement les propriétés d'usage de bon nombre de matériaux métalliques. Or, les premiers instants de la précipitation sont, à l'heure actuelle, mal connus. Quels sont les paramètres qui régissent la morphologie des précipités ? Pourquoi certains précipités germent-ils sur les dislocations ? Pourquoi la chimie des

précipités est-elle parfois différente de celle du même matériau massif ? L'ambition de ce mémoire n'est pas de trouver des réponses à toutes ces questions, mais de proposer une approche qui combine les outils expérimentaux locaux (microscopies) et globaux (pouvoir thermoélectrique, diffusion des rayons X,..) à des techniques de modélisation allant de l'échelle atomique (dynamique moléculaire, Monte-Carlo cinétique) à l'échelle mésoscopique (théorie « classique » de la germination, thermodynamique). Dans ce mémoire, un point est fait sur les travaux que j'ai réalisés dans ce domaine au laboratoire MATEIS et sur les collaborations qu'ils ont impliquées. Une large place est faite aux perspectives dégagées par ces quelques années de recherche et d'enseignement effectuées à l'INSA de Lyon.

AVRIL Stéphane, ENSAM Châlons

Date soutenance : 8 novembre 2007

Titre : Vers une approche intégrée d'identification à partir de mesures de champs en mécanique du solide

Résumé : La mécanique du solide, consistant à étudier les déformations et la résistance de matériaux industriels soumis à des forces, a observé ces dernières décennies une véritable révolution. Du point de vue de la modélisation, on sait aujourd'hui prévoir et simuler grâce aux ordinateurs la réponse de n'importe quelle structure à une sollicitation mécanique donnée pourvu que les propriétés de la matière qui la constitue soient connues. Du point de vue de l'expérience, on peut aujourd'hui, grâce aux méthodes optiques et aux caméras haute résolution, enregistrer la réponse d'une structure en temps réel, voire à l'intérieur des solides par tomographie. Finalement, le principal verrou aujourd'hui consiste à faire « dialoguer » modèles et mesures lorsque ceux-ci sont ainsi sophistiqués. C'est à cette charnière que se situent les travaux de recherche réalisés ou encadrés par S. Avril au LMPF, contribuant ainsi à développer une approche, dite inverse, qui permet de déduire à partir des données d'une expérience, les paramètres nécessaires à la modélisation d'un matériau ou d'une structure. L'approche en question est appelée méthode des champs virtuels (MCV). Initiée par le Pr. Michel Grédiac et reprise par le Pr. Fabrice Pierron, la MCV a été spécialement développée pour traiter des mesures optiques de champs, c'est-à-dire obtenues par caméra. La contribution de S. Avril a permis à la MCV de concurrencer les approches de type recalage, en particulier concernant la précision des résultats qu'elle fournit et la rapidité des calculs. Un logiciel en accès libre sur Internet, appelé Camfit, a été programmé. Il permet d'identifier, pour des structures planes, les paramètres de modèles simples pour la mécanique des solides homogènes, comme l'élasticité linéaire, l'élastoplasticité, l'élastoviscoplasticité, . Cela a conduit à des applications sur des cas concrets tels que la détermination des coefficients de rigidité de matériaux composites, de bois ou encore la détermination des paramètres de plasticité dans des joints soudés par friction malaxage. Des collaborations ont pu être établies avec le CEA, l'ONERA, Airbus UK, ou encore avec des Universités étrangères comme Imperial College à Londres ou l'Université de Caroline du Sud aux Etats-Unis. S. Avril a aussi fait un séjour de 10 mois en 2006 à l'Université de Loughborough en Grande Bretagne, pour développer une partie du logiciel et l'appliquer à des mesures 3D obtenues par imagerie médicale sur des solides hétérogènes. Les travaux qui font l'objet de ces recherches présentent aujourd'hui un très fort potentiel. Maintenant que les expériences utilisant des mesures optiques de champ ont pu être « mises en dialogue » avec des modèles simples de mécanique des solides homogènes, via le développement de la MCV, l'approche peut s'étendre aux comportements complexes, présentant un intérêt encore plus grand pour la communauté scientifique et pour le monde industriel, tels qu'en dynamique rapide, aux échelles microscopiques ou nanoscopiques, ou encore aux comportements mécaniques in-vivo des tissus humains. C'est vers cette dernière voie que S. Avril a décidé de s'orienter en initiant des

travaux sur la caractérisation des parois artérielles à partir de scanners IRM. D'autres applications en lien avec la lutte contre les maladies cardio-vasculaires sont d'ailleurs à l'étude.

HOC Thierry, Centrale Paris

Date soutenance : 19 novembre 2007

Titre : Apport de la modélisation multiéchelles dans l'étude des propriétés mécaniques locales des matériaux cristallins et biologiques

DENDIEVEL Rémy, INPG

Date soutenance : 6 décembre 2007

Titre : Approches numériques pour matériaux cellulaires et enchevêtrés

Résumé : Matériaux cellulaires et enchevêtrés ont fait l'objet ces dernières années d'un intérêt croissant, en écho notamment avec les problématiques d'allègement, de sécurité, d'isolation dans les domaines des transports ou du bâtiment. Si les matériaux sont très divers (des mousses métalliques aux nanotubes de carbone ...), les modélisations développées au GPM2 recèlent de nombreux points communs, parmi lesquels on peut citer la nature discrètes des approches numériques, la forte corrélation avec les techniques d'imagerie 3D (tomographie X), le caractère multifonctionnel des propriétés effectives recherchées (mécaniques, électriques, thermiques, ...). Les approches numériques développées ont permis de mettre en évidence l'influence de la structure sur ces propriétés effectives au travers notamment de la dispersion de l'arrangement cellulaire, des rapports de forme et niveaux d'enchevêtrement pour les matériaux fibreux ..., ouvrant la voie à une ingénierie de l'optimisation des architectures pour ce type de matériaux.

GRAVOUIL Anthony, INSA Lyon

Date soutenance : 18 décembre 2007

Titre : Contributions aux méthodes multi-échelles en calcul des structures - Application à la dynamique non-linéaire des structures et au phénomène de fissuration

Résumé : Ce travail se situe dans le cadre de la modélisation multi-échelles en mécanique des structures non-linéaire avec application à la simulation des phénomènes de crash, d'impact, séismes, et fissuration. Dans une première partie, nous développons une stratégie unifiée pour maîtriser localement la précision et le pas de temps en dynamique transitoire non-linéaire. Dans le cadre d'une formulation mixte de type Schur duale, nous montrons par une méthode énergétique que seule la continuité des vitesses discrétisées à l'interface autorise le couplage de schémas numériques en temps différents avec leur propre échelle de temps, et ceci pour de très grands rapports de pas de temps. D'autre part, cette approche a été étendue vers une stratégie multi-échelles espace-temps à précision contrôlée avec raffinement automatique pour la dynamique des structures. Dans une deuxième partie, nous proposons une extension de la méthode des éléments finis étendus aux problèmes dépendants du temps avec une application à la fissuration. On montre ainsi que les avantages de la méthode des éléments finis étendus peuvent être préservés en fissuration dynamique, en fissuration par fatigue avec plasticité confinée, contact et frottement inter-facial, en modifiant la stratégie de réactualisation des fonctions d'enrichissement. Enfin, il est montré que malgré l'indépendance de l'interface vis-à-vis du maillage, il est nécessaire de développer un cadre multi-échelles apte à capturer l'échelle associée à la fissure, ainsi que les nonlinéarités locales de volume et d'interface. Enfin, nous proposons une stratégie générale de représentation tridimensionnelle des fissures

par fonctions de niveaux couplée à la méthode des éléments finis étendus en adéquation avec les techniques d'imagerie par microtomographie X et de mesure de champ par corrélation d'image en vue d'appréhender les lois qui gouvernent la propagation tridimensionnelle des fissures.

Thèses

RISHMANY Jihad, Université Toulouse

Directeurs de thèse : F. Rezaï-Aria, C. Mabru

Date soutenance : 17 avril 2006

Titre : Comportement statique et dynamique d'une structure périodique 3D d'un échangeur aéronautique : Étude expérimentale, modélisation et simulations numériques

Résumé : Les échangeurs thermiques aéronautiques sont soumis pendant leur utilisation à un environnement complexe combinant la pression, la température et les vibrations. Pour prédire la durée de vie de tels équipements, une analyse du comportement est indispensable. L'objectif de cette thèse est l'analyse du comportement statique et dynamique du faisceau d'un échangeur thermique compact type air-air. Le faisceau de l'échangeur est une structure complexe périodique en 3-D composée d'un empilement alterné d'intercalaires où passe l'air chaud et froid respectivement. Une partie importante de ce travail est consacrée à l'étude statique du faisceau. Différentes approches analytiques et numériques sont employées pour modéliser le comportement statique global du faisceau à chaud et à froid. Les différentes approches sont basées sur l'étude d'une cellule élémentaire de la structure. Les résultats statiques sont validés par des essais expérimentaux sur différents types d'éprouvettes. À l'issue de cette partie, deux modèles sont proposés pour remplacer la structure réelle du faisceau : un modèle « homogène » formé d'un seul matériau équivalent, et un modèle « stratifié » formé de deux matériaux équivalents représentant les passes chaudes et froides. La seconde partie de ce travail traite de la modélisation dynamique du faisceau. La comparaison des résultats expérimentaux et numériques montre que les deux modèles « homogène » et « stratifié » sont capables de prédire de manière satisfaisante le comportement dynamique du faisceau.

OULD OUALI Mohand, Université de Reims Champagne Ardenne

Directeur de thèse : L. Siad

Date soutenance : 20 avril 2007

Titre : Approche micromécanique de la rupture ductile dans les procédés de mise en forme des matériaux. Prise en compte de l'effet de forme des microcavités.

Résumé : Le besoin grandissant des entreprises à répondre aux exigences de fiabilité et de qualité de leurs produits tout en optimisant les coûts et les délais de réalisation les pousse à prendre en considération tous les facteurs entrant dans le processus de conception des pièces mécaniques. Parmi ces facteurs, il y a lieu de citer la prédiction de la rupture des structures. Celle-ci fait souvent appel à la simulation numérique qui nécessite l'utilisation de lois de comportement avancées pouvant décrire la dégradation du matériau en cours de déformation. La rupture ductile des matériaux lors des opérations de leur mise en forme se manifeste à l'issue des phases de croissance et de coalescence de cavités qui se sont amorcées généralement soit par décohésion aux interfaces matrice-inclusions, soit par rupture des inclusions. La présence de ces inclusions est souvent préméditée en vue de l'amélioration de certaines propriétés mécaniques. Quant aux cavités, elles représentent une source

d'endommagement du matériau lors de sa plastification avancée. Le travail de cette thèse est focalisée sur le modèle de comportement ductile pour matériaux plastiques poreux développé par Gologanu, Leblond et Devaux (GLD) qui est employé pour simuler numériquement le comportement à la rupture des matériaux lors de leur mise en forme par déformation plastique. Pour mémoire, la construction de ce modèle de comportement est fondée sur l'analyse limite d'un volume élémentaire représentatif (VER) ellipsoïdal axisymétrique contenant une cavité ellipsoïdale et confocale. Malgré sa simplicité, la forme ellipsoïdale permet cependant de représenter avec une bonne approximation un grand nombre de formes de cavités observées dans les matériaux métalliques, incluant comme cas limites la fissure en forme de *pièce de monnaie* et la cavité très allongé en forme d'*aiguille*. Le modèle GLD consiste en *i)* un critère de plasticité macroscopique dépendant comme attendu de la porosité du VER et du facteur de forme de la cavité qui s'y trouve. Ce sont les deux paramètres internes ; *ii)* une loi d'écoulement plastique associée au critère par la règle de normalité ; *iii)* et de deux lois d'évolution pour chacun des paramètres internes. Une extension du modèle GLD prenant en compte l'échauffement thermique dû à la déformation plastique du matériau est proposée. Le couplage température-plasticité-endommagement ainsi effectué est censé mieux rendre compte du comportement de la microstructure, notamment en raison de l'adoucissement thermique qui y est généré. Le modèle GLD est implémenté dans le code ABAQUS/Explicit via la routine utilisateur Vumat. Nous indiquons les précautions à prendre lors de cette implémentation pour pouvoir l'utiliser dans le cas des grandes déformations. L'implémentation du modèle est réalisée en suivant la même procédure. Le schéma d'intégration des équations constitutives retenu est celui proposé par Aravas (1987). Dans le cas d'un comportement thermomécanique non adiabatique, le schéma de résolution explicite séquentiel permet une résolution en deux temps : calcul de la solution mécanique et de la dissipation plastique correspondante, puis estimation de l'échauffement thermique généré par cette dissipation. En guise de validation de l'implémentation du modèle GLD, nous utilisons d'abord une technique de calculs explicite de cellules permettant de maintenir une triaxialité constante tout au long de leurs trajets de chargement. Nous comparons alors les résultats obtenus avec le modèle GLD avec ceux fournis par les calculs de cellules. Nous effectuons ensuite deux études numériques de traction d'éprouvettes. La première, effectuée en utilisant les modèles GLD et GTN, concerne la traction d'une barre cylindrique lisse. Cette application permet de mettre en évidence le rôle du changement de forme des cavités lors d'un chargement de traction monotone. La deuxième étude est un essai de traction d'une éprouvette axisymétrique entaillée. Elle est réalisée dans le but de faire ressortir le rôle du couplage thermomécanique. Finalement le modèle GLD est employé pour le suivi de l'endommagement de matériaux dans les procédés de mise en forme que sont l'écrasement de lopins, l'emboutissage d'une tôle et le laminage d'une barre. Dans les deux premiers exemples, nous comparons les résultats des simulations numériques avec ceux expérimentaux disponibles dans la littérature (Gouveia et al., 1996, 2000 et Khelifa et al., 2004, 2007). Nous effectuons aussi une étude de l'influence de différents paramètres intervenant dans le laminage, y compris l'effet du couplage thermomécanique.

SZCZUREK Eddy, Université Valenciennes Hainaut Cambrésis

Directeur de thèse : L. Dubar

Date soutenance : 11 mai 2007

Titre : New approach to the analysis of ribbing in coil coating

Résumé : L'enduction par rouleaux déformables est largement utilisée dans l'industrie du pré laquage d'acier galvanisé. Le but du pré laquage est d'appliquer une fine épaisseur de peinture liquide sur un support en mouvement. Ce procédé permet une application en continu et sans

défaut en théorie. En réalité, un défaut nommé “cordage” apparaît et se caractérise par des rides de peinture parallèles au sens de défilement de la bande. L'épaisseur humide appliquée sur la bande est réglée au travers de différents passages entre les rouleaux. L'épaisseur finale et la stabilité de l'application sont modifiées par les vitesses de rouleaux et les efforts de serrage. Le revêtement d'élastomère qui recouvre certains rouleaux permet une application de peinture plus fine, d'éviter l'usure des rouleaux et de retarder l'apparition du défaut de cordage. L'épaisseur humide appliquée sur la bande est fonction du ratio de vitesse entre les rouleaux en contact, le rayon des rouleaux, les propriétés matériaux de l'élastomère, les propriétés du fluide, l'effort de serrage appliqué entre rouleaux, la rugosité des rouleaux et l'épaisseur du revêtement d'élastomère. Dans cette étude, l'écoulement entre le rouleau applicateur et le rouleau preneur est présenté pour un serrage dit « négatif ». Le but de cette étude est l'optimisation de l'application pour des conditions industrielles, et cela à travers la maîtrise des paramètres de contact à l'interface bande / rouleau. L'originalité de cette étude par rapport aux travaux déjà publiés est la prise en compte des revêtements d'élastomère et de l'environnement industriel. Pour ce faire, un test spécifique de compression est développé pour analyser le comportement de l'élastomère face aux sollicitations et ambiance chimique industrielles. Des modifications du module de Young et du temps de relaxation sont observés en fonction de l'environnement chimique. A partir des résultats de compression cyclique, des séries de Prony sont identifiées et sont utilisées pour modéliser le comportement viscoélastique de l'élastomère dans la simulation. Une modélisation par éléments finis du procédé est réalisée via une architecture de simulation solide-fluide. La première simulation solide permet d'évaluer la pression dans le contact en fonction des paramètres de réglages et des propriétés de l'élastomère. La seconde permet d'obtenir l'épaisseur humide et la position de la surface libre. Afin de corréler ces résultats numériques au procédé industriel, une approche expérimentale est réalisée sur une tête d'enduction industrielle. Une base de données complète est créée, et pour chaque réglage, une macrophotographie du défaut est prise. Un outil spécifique de traitement d'image est développé pour évaluer la période du cordage sur ces photographies. Cette évaluation de période du défaut permet de relier les positions de surface libre numériques en 2D à l'instabilité en 3D pour différents réglages machine.

SCHWOB Cyrille, Mines Albi - EADS

Directeur de thèse : F. Ronde-Oustau

Date soutenance : 21 mai 2007

Titre : Approche non locale probabiliste pour l'analyse en fatigue des zones à gradient de contraintes

Résumé : Les choix de conception de pièces et structures sont habituellement validés en fatigue à l'aide de critère de fatigue tels que les critères de Crossland, Dang Van ou encore Papadopoulos. Ces critères sont idéalement identifiés à partir de données expérimentales obtenues sur des éprouvettes simples. Cependant l'application de ces modèles ne conduit pas toujours à une prévision fiable du comportement en fatigue de la pièce étudiée. En effet le transfert vers une pièce réelle des caractéristiques de fatigue d'un matériau, à l'aide de critères, ne prend généralement pas directement en compte de nombreux effets, notamment les effets de concentrations de contraintes. De plus la réponse binaire d'un critère de fatigue ne reflète pas de façon adéquate l'importante dispersion observée expérimentalement lors de tout essai de fatigue. Les travaux de cette thèse s'attachent à définir un critère de fatigue prenant en compte l'effet de gradient de contrainte et à l'intégrer dans une démarche probabiliste générale.

Le critère développé est un critère non local qui moyenne un critère classique sur une zone d'influence définie par un critère mésoscopique inspiré de l'analyse de Papadopoulos. Les

prédictions de durée de vie moyenne réalisées à l'aide de ce critère ont été comparées à des résultats issus de la littérature scientifique d'une part et d'une base de données sur un alliage d'aluminium réalisée au cours de la thèse d'autre part. Au cours de cette campagne, plusieurs configurations géométriques (éprouvettes trouées et plates) et plusieurs rapports de chargements ont été testés. Les bonnes corrélations obtenues dans tous les cas montrent la robustesse du critère vis-à-vis de la géométrie et du chargement. L'intégration de ce modèle dans une démarche probabiliste nécessite alors de traiter les deux points suivants :

1. *Choix/Modélisation des sources d'incertitudes* : Les sources d'incertitudes pouvant intervenir dans un calcul de fatigue sont nombreuses (paramètres géométriques, état de surface, propriétés élasto-plastiques, microstructure,...). Cependant puisque l'on n'a considéré que des éprouvettes simples, un modèle à une seule variable aléatoire est retenu. Cette hypothèse est validée par une analyse de sensibilité du modèle. L'estimation de la fonction de distribution de cette variable aléatoire est alors décrite précisément, en lien avec le critère de fatigue.

2. *Propagation des incertitudes* : Celle-ci est réalisée par une méthode de Monte-Carlo. Afin de tenir compte des besoins en temps de calculs propres aux calculs de structures, une méthode de propagation dégradée est ensuite proposée. Les résultats obtenus sont comparés aux résultats d'expérience de la campagne d'essais de fatigue spécialement réalisée pendant cette thèse. En particulier, toutes les éprouvettes testées proviennent du même lot de matériau et ont été testées dans les mêmes conditions (afin de respecter au mieux l'hypothèse d'une seule source d'aléa).

La comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux démontre, sur un ensemble cependant limité de données, que le modèle complet permet de générer numériquement des courbes de Wöhler dont la qualité statistique est comparable aux courbes de Wöhler expérimentales.

GAUDIN Vincent, Université Grenoble

Directeurs de thèse : D. Favier, L. Orgeas

Date soutenance : 23 mai 2007

Titre : Contribution à l'étude de micromuscles artificiels activables par pression osmotique et implantables en milieu biologique

Résumé : Ce travail est une contribution au développement de micromuscles artificiels reposant sur une voie innovante de production, au sein du corps humain, d'énergie mécanique à partir de l'énergie chimique par processus osmotique. La recherche a un caractère générique, les applications biomédicales potentielles étant nombreuses ; elle s'appuie sur un cas concret de conception d'une structure à membrane semi-perméable gonflable (joint osmotique) destiné à éliminer les endofuites se produisant fréquemment au niveau des endoprothèses pour anévrisme de l'aorte abdominale. Après l'exposé du phénomène d'osmose et de l'application envisagée, l'étude se décompose en deux parties.

La première partie porte sur la caractérisation osmo-mécanique du système osmotique eau/membrane d'acétate de cellulose/saccharose. Des dispositifs expérimentaux originaux ont été mis en place. Dans le domaine d'utilisation envisagé, la membrane présente un comportement mécanique principalement élasto-plastique et sa perméabilité dépend fortement de son état de déformation.

Dans la seconde partie, un modèle numérique de la zone de contact entre le collet de l'anévrisme et l'endoprothèse munie d'un joint gonflable est mis en place. La modélisation du joint membranaire s'appuie sur les résultats de la première partie. Les comportements mécaniques de l'endoprothèse et de l'aorte sont modélisés sur la base de résultats de la littérature respectivement par une simple loi isotrope élastique linéaire et un potentiel

hyperélastique isotrope en série de Rivlin. Une étude paramétrique permet alors de souligner la faisabilité de cette endoprothèse et l'influence de quelques paramètres de conception sur ses performances.

BILAT Anne-Sophie, Mines Paris

Date soutenance : 1^{er} juin 2007

Titre : Estimation du risque de rupture fragile de soudures de pipelines en aciers à haut grade : caractérisation et modélisation

Résumé : Dans le but de réduire les coûts de transport du gaz, il est prévu d'augmenter les pressions de service des pipelines. Pour ce faire, des aciers à haute limite d'élasticité ferrito-bainitiques, type X100 (limite d'élasticité 100ksi = 690 MPa), ont été mis au point. L'étude consiste à vérifier les propriétés à froid des soudures de rabouillage par des essais mécaniques dans le métal de base, le métal fondu, la zone affectée thermiquement à gros grains et la zone affectée thermiquement à grains fins. Les deux ZAT, trop petites pour être testées individuellement, sont reproduites à l'aide d'une machine Gleeble. Une procédure spécifique pour l'identification des lois de comportement mécanique est mise en place pour les éprouvettes de ZAT simulée, afin de tenir compte des hétérogénéités métallurgiques de ces éprouvettes. On effectue des essais de traction sur éprouvettes lisses et entaillées, des essais de flexion en dynamique (Charpy) et en quasi-statique, à différentes températures, afin de localiser la zone critique de l'assemblage et de décrire le comportement mécanique des 4 zones. Le comportement de chaque partie du joint soudé est utilisé dans un calcul par éléments finis (Zébulon) de l'assemblage complet et un critère en contrainte critique tente de prédire la rupture de la soudure. Les résultats sont comparés à ceux obtenus par les règles de dimensionnement usuellement utilisées par les exploitants (Failure Assessment Diagrams).

BRUNEL Florent, Université Lille I

Directeurs de thèse : P. Dufrenoy, J.F. Brunel

Date soutenance : 5 juillet 2007

Titre : Etude thermomécanique du couple roue-semelle ferroviaire sous sollicitations de freinage.

Résumé : Le freinage roue-semelle, principalement utilisé dans le transport fret, est un système ancien mais qui reste économique de par son architecture. Il présente l'inconvénient majeur de solliciter directement la roue. Les enjeux sécuritaires et de performances nécessitent des procédures d'homologation longues et coûteuses pour l'acceptation d'une roue ou d'une semelle en service commercial. Cette étude vise à développer des outils numériques permettant la présélection d'un couple roue-semelle face à une application donnée et le développement de nouvelles solutions. Les objectifs des deux partenaires de cette étude, Valdunes, fabricant de roues et Flertex, fabricant de semelles, sont plus précisément : l'évolution des contraintes résiduelles dans la roue sous sollicitations de freinage et la prédiction des températures dans le couple roue-semelle.

La première phase de ce travail a consisté en une investigation expérimentale approfondie permettant d'identifier les phénomènes prépondérants mis en jeu dans le freinage roue-semelle et d'orienter les modélisations numériques. L'analyse des freinages à l'aide d'une instrumentation thermique (thermocouples et caméra infrarouge) et mécanique (mesures de contraintes résiduelles) a permis d'établir une classification des différents gradients thermiques observés. Une distinction a pu être faite entre les freinages d'arrêts (localisations de type « bandes chaudes » étroites circulant dans le contact, avec peu de modifications des

contraintes résiduelles) et les freinages de maintien (bandes chaudes larges et centrées dans le cas des semelles organiques et modification des contraintes résiduelles).

La détermination des températures et des gradients thermiques est obtenue par une modélisation 2D thermomécanique du couple roue-semelle avec intégration des phénomènes d'usure et d'interface thermique. Elle permet la mise en évidence des phénomènes mis en jeu dans l'apparition et la circulation des bandes chaudes, par compétition entre les phénomènes de dilatations thermiques et d'usure. Le modèle est validé par confrontation avec les mesures expérimentales. Une seconde modélisation est proposée permettant la prise en compte de la géométrie 3D de la semelle. L'originalité se situe dans la résolution thermique transitoire de la roue, basée sur un suivi temporel d'une section de roue suivie d'une reconstitution 3D. Les résultats permettent la prédiction des localisations sur toute la surface de frottement. L'utilisation conjointe de ces modèles permet de répondre à l'objectif de prédiction des gradients thermiques et de mise à disposition de moyens d'optimisation de la semelle.

Pour le second objectif de prédiction de l'évolution des contraintes résiduelles dans les roues, la détermination de l'état initial, issu du traitement thermique, est nécessaire. Elle est réalisée à l'aide d'un modèle thermomécanique 2D axisymétrique. Le coefficient d'échange thermique, lors de la trempe, a été identifié sur un dispositif expérimental développé spécifiquement. Différentes simulations ont pu montrer l'importance du modèle de comportement du matériau de la roue sur la distribution des contraintes résiduelles, notamment la prise en compte des phénomènes visqueux. Les résultats indiquent une bonne prédiction de l'évolution des contraintes résiduelles, de compression après le traitement thermique puis leur passage en traction après freinages, en conformité avec les relevés expérimentaux. Des compléments sont en cours pour une meilleure identification du modèle de comportement du matériau de la roue.

FOURNIER Benjamin, Mines Paris / CEA Saclay

Directeurs de thèse : A. Pineau, M. Sauzay

Date soutenance : 19 septembre 2007

Titre : Fatigue-fluage des aciers martensitiques à 9-12%Cr : comportement et endommagement

Résumé : Une des voies explorées, afin d'accroître les rendements des centrales nucléaires, est d'augmenter la température de fonctionnement. Cet accroissement des températures (entre 500 et 600°C principalement) a évidemment des répercussions sur le choix des matériaux de structure. C'est dans ce contexte que les aciers martensitiques de la famille des 9-12%Cr sont intensément étudiés par le CEA. Ces aciers présentent des propriétés physiques et mécaniques (conductivité thermique, coefficient de dilatation thermique, résistance au gonflement sous irradiation, à la corrosion sous contrainte,...) qui en font des matériaux de choix pour nombre de structures de ces futurs réacteurs. La plupart de ces structures seront essentiellement sollicitées en fluage. Néanmoins, des sollicitations cycliques, liées notamment aux arrêts et redémarrages de tranches, aux phases de maintenance et, dans une moindre mesure, au suivi de réseau, peuvent, elles aussi, exister. Devant l'impossibilité de reproduire en laboratoire les sollicitations réelles imposées en service (périodes de maintien d'un à plusieurs mois entrecoupées par des phases de cyclage à faible amplitude de déformation, et ce pour des durées de vie de 60 ans), il est nécessaire d'asseoir les règles de dimensionnement sur la compréhension des mécanismes physiques responsables du comportement et de l'endommagement. Ce travail de thèse s'articule autour des deux grands axes que sont le comportement et l'endommagement à haute température et sous sollicitations de fatigue-fluage des aciers martensitiques de la famille des 9-12%Cr. Dans les deux cas, les modèles proposés, afin de rendre compte des résultats d'essais macroscopiques, se basent sur

l'identification des mécanismes microscopiques par le biais d'observations détaillées (MEB, MET, EBSD, AFM,...). En termes de comportement, l'adoucissement observé après déformation cyclique, et largement rapporté dans la littérature, a pu être clairement relié au grossissement de la microstructure et à la baisse de la densité de dislocations. Ce sont la disparition de l'ensemble des sous-joints, situés à l'intérieur des blocs de lattes de la martensite revenue, et la diminution de la densité de dislocations, qui entraînent une chute de la contrainte cinématique, expliquant ainsi l'adoucissement macroscopique. Les essais menés ont montré que même de très faibles niveaux de déformation cyclique étaient suffisants pour modifier la microstructure de ces aciers et mener à une dégradation de leurs propriétés mécaniques vis-à-vis de leur comportement cyclique et de leur tenue au fluage. Une modélisation micromécanique de l'adoucissement cyclique, basée sur les phénomènes observés est proposée et donne des résultats encourageants. En termes d'endommagement et de durée de vie, notre étude a montré, en accord avec la revue bibliographique présentée, qu'en fatigue, comme en fatigue-relaxation (entre 20 et 600°C), la déformation (visco)plastique appliquée est le principal facteur influençant la durée de vie des aciers à 9-12%Cr. Il s'avère qu'à 550°C et pour les niveaux de sollicitation testés, quasiment aucun endommagement de fluage classique (cavitation ou fissuration intergranulaire), n'a pu être observé. En outre, à cette température, l'oxydation joue un rôle primordial, tant sur l'amorçage que sur la propagation des fissures. Des essais menés sous différentes atmosphères (sous vide et sous hélium) ont permis de valider ces mécanismes en soulignant l'influence majeure de l'environnement. Un schéma de prédiction de durée de vie, basé sur le modèle de Tanaka et Mura pour la phase d'amorçage et sur celui de Tomkins pour la phase de propagation a été proposé. Identifié sur un faible nombre d'essais, ce modèle permet de prédire avec précision, l'ensemble des durées de vie de fatigue, fatigue-relaxation et fatigue-fluage, obtenues à 550°C. En outre, les mécanismes d'endommagement sur lesquels ce modèle se base sont, au vu des résultats de la littérature, pertinents sur une large gamme de températures, de niveaux de déformation et de temps de maintien.

LIBERT Maximilien, Centrale Paris

Directeurs de thèse : C. Rey, B. Marini

Date soutenance : 21 septembre 2007

Titre : Études expérimentale et numérique de l'effet des mécanismes de plasticité sur la rupture fragile par clivage dans les aciers faiblement alliés

Résumé : Il est crucial de garantir l'intégrité des cuves de réacteurs à eau pressurisée (REP) en cas de fonctionnement accidentel : dans ce contexte, la compréhension et la modélisation des mécanismes de rupture fragile des aciers constituent des éléments décisifs de l'évaluation complexe des durées de vie des cuves.

Les modèles d'approche locale de la rupture par clivage constituent l'un des principaux outils de prédiction de la ténacité des aciers faiblement alliés. La dispersion des contraintes à rupture est interprétée comme un effet de la distribution des défauts dans la microstructure, mais l'effet des hétérogénéités mécaniques n'est pas pris en compte. Or, en dessous d'une température de transition de comportement T_a (de l'ordre de 25°C), les mécanismes de déformation sont grandement affectés par la température et la vitesse de déformation.

Notre approche consiste à prendre en compte l'effet des hétérogénéités de contraintes dans un critère local d'amorçage du clivage. Les résultats de calculs de microstructure sont utilisés pour proposer une description statistique de l'évolution des distributions de contraintes locales. Cette approche statistique permet de proposer un modèle d'approche locale de la rupture dépendant à la fois des hétérogénéités mécaniques et des distributions de tailles de défauts.

Le comportement du matériau et son évolution sont caractérisés aux échelles microscopique et macroscopique dans le domaine de température [25°C,-196°C]. Des essais de traction simple, de sauts de vitesse et de température, et de ténacité sont réalisés.

Nous proposons un modèle de comportement micromécanique décrivant les mécanismes de plasticité en dessous de la température de transition T_a . La loi de comportement est basée sur les mécanismes de déformation décrits dans la bibliographie et identifiée par méthode inverse à partir des essais mécaniques. Les observations au MET et la caractérisation du comportement activé thermiquement permettent de fixer plusieurs paramètres du modèle.

Afin de modéliser les distributions de contrainte principale σ_1 , des simulations sont réalisées dans deux microstructures bainitiques dont le volume $(50\mu\text{m})^3$ correspond au volume V_0 de l'approche locale de la rupture. On caractérise l'effet de la température et de la triaxialité sur l'évolution des hétérogénéités de σ_1 . Nous proposons une fonction de distribution décrivant la distribution des valeurs locales de σ_1 en fonction des contraintes principales et équivalente $\langle\sigma_1\rangle$ et $\langle\sigma_{mises}\rangle$ moyennes dans la microstructure.

Cette fonction est utilisée pour formuler un modèle d'approche locale de la rupture intégrant la distribution des tailles de défauts critiques et les distributions de σ_1 . On montre que dans certains cas, la dispersion des contraintes locales suffit à expliquer les dispersions des contraintes à rupture à l'échelle du volume élémentaire. Les dispersions de contraintes à rupture sont en accord avec celles prédites par le modèle de Beremin. La prise en compte des hétérogénéités mécaniques permet d'introduire une dépendance de la probabilité de rupture en fonction de la température, de la déformation et de la triaxialité. Il reste à appliquer le modèle d'approche locale au calcul d'éprouvettes CT et de comparer les dispersions de ténacités simulées à celles mesurées expérimentalement.

SHIGESATO Genichi, Université Joseph Fourier

Directeur de thèse : E. Rauch, M. Fivel

Date soutenance : 25 septembre 2007

Titre : Development of dislocation structures in steels: relation with the mechanical properties

ROLLET Yannis, LMS Polytechnique / ONERA

Directeurs de thèse : M. Bonnet, N. Carrère

Date soutenance : 26 septembre 2007

Titre : Vers une maîtrise des incertitudes pour le calcul des structures composites

Résumé : Les exigences de sécurité dans le domaine aéronautique imposent de tenir compte des diverses incertitudes affectant les structures, notamment la variabilité matériau. Malgré son essor la simulation numérique considère actuellement cette problématique de façon simplifiée, par exemple en usant d'abattements sur les valeurs de propriétés utilisées dans les calculs. Mais l'emploi accru des matériaux composites, par nature plus sensibles aux incertitudes, demande l'introduction de méthodes plus précises afin d'assurer une meilleure robustesse du dimensionnement. Pour cela, il a été développé une nouvelle démarche dite d'Analyse de Variabilité respectant certaines contraintes de la simulation numérique telle l'indépendance vis-à-vis du code de calcul (non-intrusivité) et la parcimonie des calculs. Face à la grande diversité des techniques de transport d'incertitudes, le choix a été fait de construire une démarche en s'appuyant sur les techniques de surfaces de réponses. Afin d'exploiter au mieux les diverses formes retenues (polynômes en les paramètres incertains, chaos polynomial, krigeage) pour construire l'approximation, la démarche a été rendue progressive. Des méthodes de validation croisée (*leave-k-out*, *bootstrap*) ont été utilisées pour évaluer la qualité de l'approximation. Ainsi, il est possible d'afficher une estimation des effets des

incertitudes (par exemple sous la forme de barres d'erreur) mais également de quantifier la confiance dans cette estimation. La validation de la démarche s'est tout d'abord appuyée sur des exemples mathématiques, puis sur des situations mécaniques simples et analytiques. Les résultats obtenus montrent notamment une bonne cohérence vis-à-vis des simulations de Monte-Carlo pour un coût de calcul nettement inférieur. Les incertitudes considérées portent aussi bien sur des paramètres géométriques que matériau, avec notamment des caractéristiques propres aux composites (angles d'empilement, épaisseur des plis). L'application de la démarche à divers exemples (plaque multiperforée, assemblage boulonné,...) de calcul de structures par la méthode des éléments finis a souligné son applicabilité pour un surcoût de calcul raisonnable. Pour finir, le problème de la réduction des effets des incertitudes a été abordé sous des angles classiques comme la réduction des incertitudes d'entrée ou l'amélioration de la qualité des modèles utilisés. Enfin, une méthode plus originale, dite de consolidation de bases de données, utilisant les corrélations entre paramètres mesurés aux diverses échelles des composites a été proposée.

PROMBUT Pongtorn, Université Paul Sabatier

Directeurs de thèse : J.J. Barrau, L. Michel

Date soutenance : 27 septembre 2007

Titre : Caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels

Résumé : De nombreuses études se consacrent à une meilleure connaissance de la propagation de délaminage à cause de son importance pour l'utilisation des stratifiés composites. Néanmoins, elles sont majoritairement orientées vers le stratifié unidirectionnel (UD). Le délaminage des interfaces non-unidirectionnelles a reçu moins d'attention. L'objectif de ce travail est de développer une méthodologie permettant d'établir un critère de propagation du délaminage pour des stratifiés composites multidirectionnels (MD). Pour cela, nous avons mis en place une stratégie d'essais afin d'évaluer la résistance au délaminage en modes mixtes I+II sans faire l'essai en mode I pur sur l'interface MD. Ce dernier a été évité car un problème de changement de plan du délaminage a été anticipé. Deux séquences d'empilement multidirectionnelles, symétrique et asymétrique, avec une interface de délaminage de $45^\circ/0^\circ$ ont été déterminées à l'aide de la théorie classique des stratifiés et de simulations par éléments finis. Puis, la caractérisation du délaminage a été effectuée pour l'interface $0^\circ/0^\circ$ (UD) et l'interface $45^\circ/0^\circ$ (MD), pour le composite carbone-époxy T700/M21. Des vérifications avant et après essai montrent que les deux séquences MD présentent des comportements convenables pour l'essai de délaminage. Ensuite, le dépouillement des résultats d'essai a été réalisé selon trois approches : expérimentale, analytique, et numérique.

La méthode de la complaisance expérimentale s'est révélée la plus adaptée pour la détermination de la résistance au délaminage (G_{rc}) des deux interfaces. Pour les essais en mode mixte I+II, le calcul de la répartition des modes de délaminage a été assuré par simulation numérique de la propagation dans une « couche de résine » positionnée à l'interface. Enfin, la réponse à la rupture par délaminage a été représentée par un critère semi-empirique pour chaque interface. La comparaison des critères montre que les deux interfaces présentent une résistance comparable au délaminage en mode I pur tandis que l'interface $45^\circ/0^\circ$ est plus résistante au délaminage en modes mixtes I+II et en mode II pur.

PRABEL Benoît, INSA Lyon / CEA Saclay

Directeurs de thèse : A. Combescure, S. Marie

Date soutenance : 28 septembre 2007

Titre : Modélisation avec la méthode X-FEM de la propagation dynamique et de l'arrêt de fissure de clivage

Résumé : Ce mémoire de thèse présente l'étude de la propagation et de l'arrêt d'une fissure de clivage dans un acier de cuve REP. L'étude bibliographique rappelle quelques éléments de mécanique de la rupture en dynamique. Elle montre que la compréhension des phénomènes associés à la propagation instable d'une fissure de clivage n'est pas complète à ce jour. Une bonne connaissance expérimentale des grandeurs en jeu, ainsi qu'un outil numérique capable de reproduire fidèlement ces phénomènes, sont des éléments permettant de faire progresser les modèles de propagation, notamment en ce qui concerne la définition d'un paramètre de fissuration pertinent. La méthode des éléments finis étendus (X-FEM) a été implantée dans le code de calcul Cast3m. Cet outil numérique permet de simuler la propagation arbitraire de fissure sans avoir à la mailler. Afin d'améliorer cette méthode, on propose deux techniques. D'une part, on définit les fonctions de niveau qui décrivent la géométrie de la fissure sur une grille auxiliaire découplée du maillage de la structure, pour permettre une excellente qualité de la représentation de la fissure. D'autre part, afin d'étendre l'utilisation des éléments enrichis au cas d'un matériau inélastique, on propose une intégration non conforme des éléments proches du front de fissure. Cette technique permet d'intégrer de manière précise les fonctions d'enrichissements, et évite la projection de champs au voisinage de la pointe de fissure. La campagne d'essais de propagation de fissure concerne deux géométries : des éprouvettes Compact Tension, et des éprouvettes annulaires en compression. Une attention particulière est portée aux mesures de vitesse de propagation, car elles constituent une donnée essentielle en mécanique de la rupture dynamique. On relève une vitesse comprise entre 200 et 500m/s pour les éprouvettes CT, et de l'ordre de 700m/s pour les éprouvettes annulaires. Le cas d'un chargement en mode mixte a également été examiné. Les analyses de faciès de rupture montrent que l'unique mécanisme de ruine rencontré pour tous les essais est le clivage (absence de ligaments ductiles). Un modèle de propagation basé sur la contrainte principale en pointe de fissure a été identifié en imposant la vitesse de propagation des éprouvettes CT. Une dépendance de la contrainte critique de clivage avec la vitesse de sollicitation (vitesse de propagation ou de déformation) a été conclue. L'application de ce modèle aux éprouvettes CT, annulaires en mode I et annulaires en mode mixte, montre qu'il est possible de prédire par la simulation numérique, le trajet de la fissure, sa vitesse d'avancée, ainsi que sa longueur à l'arrêt, avec une très bonne précision.

SORNIN Denis, UTT

Directeur de thèse : K. Saanouni

Date soutenance : 03 octobre 2007

Titre : Sur les formulations élastoplastiques non locales en gradient d'endommagement

Résumé : Il est bien établi que les résultats d'analyse éléments finis de structures impliquant des comportements mécaniques adoucissants souffrent d'une dépendance à la discrétisation spatio-temporelle. Cet ouvrage à travers l'étude de plusieurs formulations non locales propose d'aider au choix de modèles aptes à assurer l'indépendance vis à vis des aspects discretisationnels. Après une analyse des différentes formes de dépendance au maillage, les solutions existantes sont présentées. En se limitant volontairement aux cas des modèles élastoplastiques endommageables à finalité industrielle, plusieurs propositions sont spécifiquement étudiées. Les formulations sont présentées puis analysées pour des cas de sollicitations simples de traction plane. Les aspects numériques et l'implémentation dans l'environnement du logiciel ABAQUS-Standard sont particulièrement détaillés. Plusieurs de ces formulations font appel à un élément non local spécifique dont la structure et l'implémentation sont présentées. Pour chaque formulation non locale proposée, la capacité à

contrôler la taille de la zone de localisation ainsi que la dépendance de la dissipation globale vis à vis du maillage sont étudiées. Enfin les limites théoriques et pratiques de chaque formulation sont mises en lumière. Cette étude tente d'apporter des éléments scientifiques et pratiques nécessaires au choix d'une formulation élastoplastique endommageable apte à assurer l'indépendance des réponses éléments finis vis-à-vis de la discrétisation.

LORANG Xavier, Ecole Polytechnique

Directeur de thèse : M. Bonnet

Date soutenance : 04 octobre 2007

Titre : Instabilité vibratoire des structures en contact frottant. Application au crissement des freins de TGV

Résumé : Le crissement des freins des Trains à Grande Vitesse (TGV) est un bruit aigu particulièrement gênant émis lors de l'arrivée du train en gare. Ce travail a pour but de comprendre le phénomène en vue de réduire voire de supprimer l'émission du bruit. Ce phénomène acoustique est d'origine vibratoire : le crissement des freins à disque résulte des vibrations auto-entretenues des différents constituants induites par le frottement des garnitures sur le disque. Le phénomène de frottement étant lié aux aspérités de surface, il met en évidence un problème à deux échelles où un phénomène apparaissant à l'échelle microscopique crée des vibrations dans un disque à l'échelle macroscopique (amplitude de vibration du disque de l'ordre de quelques micromètres). Les phénomènes de bruits de freinage dont le crissement fait partie sont complexes, variés et ont des origines diverses selon les points de fonctionnement du mécanisme. Un état de l'art sur les différents travaux de modélisation montre qu'une instabilité de l'équilibre stationnaire dite géométrique ou par couplage de mode permet de mobiliser les modes de vibration responsables du crissement et ceci à coefficient de frottement constant. D'un point de vue modélisation, ces constatations nous orientent vers un modèle de mécanique des milieux continus déformables dans l'hypothèse de petites transformations. Beaucoup de travaux sur les vibrations auto-entretenues s'intéressent à la stabilité de l'équilibre mais font un raccourci rapide entre fréquences des modes instables et solution transitoire. Les travaux numériques traitant de la caractérisation de ces évolutions transitoires mettent en évidence des événements fortement non linéaires sous la zone de contact (comme de l'adhérence ou du décollement à cause de l'unilatéralité du contact). Un premier objectif de ce travail est l'étude de l'évolution des perturbations proches de l'équilibre vers la solution transitoire. Cette étude permet de mettre en évidence les liens entre les fréquences caractéristiques de cette solution transitoire (fréquences de crissement) et les fréquences des modes de stabilité. Le cas particulier d'un mécanisme de frein à disque TGV simplifié tridimensionnel est choisi. La transition entre l'évolution des perturbations proches de l'équilibre et l'évolution transitoire est étudiée grâce à une méthode originale de projection sur les modes de stabilité. Elle permet une étude spatiale et temporelle des champs vibratoires solutions. Son application sur le modèle simplifié de frein à disque est rendue possible grâce à une formulation eulérienne du problème. D'un point de vue calcul de structures, les solutions transitoires ont été déterminées grâce à des algorithmes et des stratégies numériques adaptés permettant de tenir compte du caractère non régulier du comportement du contact unilatéral frottant dans le cadre dynamique (tel que les situations de choc). L'instabilité de l'équilibre par couplage de mode est le mécanisme générateur de vibrations auto-entretenues privilégié dans la littérature. Qu'en est-il sur le mécanisme de freinage TGV? Cette question nous a conduit dans un premier temps à observer le comportement du mécanisme réel grâce à des campagnes d'essais. Dans un deuxième temps, elle nous a conduit à proposer un modèle de frein TGV réaliste. L'étude de la stabilité de l'équilibre a permis de prédire les fréquences de crissement mesurées. Elle a aussi permis

de préciser le mécanisme physique de couplage de mode ainsi que sa dépendance vis à vis des caractéristiques physiques des garnitures. La connaissance de ce mécanisme physique est un fil conducteur robuste dans la recherche de solutions de réduction du bruit.

LOZADA José, Polytechnique / CEA

Directeurs de thèse : X. Boutillon, M. Hafez

Date soutenance : 16 octobre 2007

Titre : Modélisation, contrôle haptique et nouvelles réalisations de claviers musicaux

Résumé : Le piano est reconnu comme un instrument permettant une grande expressivité musicale. Cette caractéristique est due à la précision de contrôle que les pianistes peuvent atteindre. Cet instrument présente une particularité : les éléments responsables du rayonnement sonore sont découplés du clavier. Le pianiste ne peut donc plus agir sur le son au moment où il l'entend et il a été montré que le contrôle de la nuance de jeu est essentiellement conditionné par le retour tactile – que nous appellerons toucher – fourni par l'instrument. À cet égard, les claviers numériques actuels doivent être améliorés. La mécanique d'actionnement communique au marteau le mouvement imposé à la touche par le pianiste. Ce système dynamique complexe formé d'un ensemble de pièces en matériaux divers, liées entre elles par des pivots et des contacts unilatéraux est responsable du toucher. L'objectif de ce travail est de concevoir un clavier numérique contrôlé capable de reproduire de manière satisfaisante le toucher d'un piano à queue. Dans un premier temps, nous avons étudié le fonctionnement de la mécanique traditionnelle. Nous avons ensuite conçu une interface haptique pour claviers musicaux à base de fluide magnéto-rhéologique et capable d'un rendu sensoriel de mêmes caractéristiques. Enfin, nous avons mis en oeuvre un système de contrôle en temps réel de cette interface. Le modèle dynamique de la mécanique traditionnelle a été réalisé en considérant six degrés de liberté et des comportements non-linéaires pour les liaisons pivots et les contacts unilatéraux. Un ensemble de procédures expérimentales a permis de valider les lois de comportement utilisées dans le modèle et d'obtenir la valeur de tous les paramètres de la modélisation. Finalement, nous avons simulé numériquement le comportement du système dans les cas quasi-statique et dynamique à l'aide de *Matlab/Simulink*. Par ailleurs, nous avons identifié et modélisé un nouveau mode opératoire pour fluides magnéto-rhéologiques que nous avons utilisé pour la conception de l'interface haptique. Un modèle mécatronique de l'interface haptique a permis de formuler une loi de commande. La procédure de contrôle en temps réel de l'interface utilise un schéma à modèle virtuel (modèle dynamique de la touche traditionnelle, par exemple) et modèle d'interface.

OMNES Benoît, Université Bretagne Sud / CETIM

Directeurs de thèse : S. Thuillier, P. Pilvin

Date soutenance : 18 octobre 2007

Titre : Sur les formulations élastoplastiques non locales en gradient d'endommagement

Résumé : Il est bien établi que les résultats d'analyse éléments finis de structures impliquant des comportements mécaniques adoucissants souffrent d'une dépendance à la discrétisation spatio-temporelle. Cet ouvrage à travers l'étude de plusieurs formulations non locales propose d'aider au choix de modèles aptes à assurer l'indépendance vis à vis des aspects discrétisationnels. Après une analyse des différentes formes de dépendance au maillage, les solutions existantes sont présentées. En se limitant volontairement aux cas des modèles élastoplastiques endommageables à finalité industrielle, plusieurs propositions sont spécifiquement étudiées. Les formulations sont présentées puis analysées pour des cas de sollicitations simples de traction plane. Les aspects numériques et l'implémentation dans

l'environnement du logiciel ABAQUS-Standard sont particulièrement détaillés. Plusieurs de ces formulations font appel à un élément non local spécifique dont la structure et l'implémentation sont présentées. Pour chaque formulation non locale proposée, la capacité à contrôler la taille de la zone de localisation ainsi que la dépendance de la dissipation globale vis à vis du maillage sont étudiées. Enfin les limites théoriques et pratiques de chaque formulation sont mises en lumière. Cette étude tente d'apporter des éléments scientifiques et pratiques nécessaires au choix d'une formulation élastoplastique endommageable apte à assurer l'indépendance des réponses éléments finis vis-à-vis de la discrétisation.

RUPIN Nicolas, Polytechnique

Directeur de thèse : M. Bornert

Date soutenance : 19 octobre 2007

Titre : Déformation à chaud de métaux biphasés : modélisations théoriques et confrontations expérimentales

Résumé : Les aciers inoxydables austéno-ferritiques présentent des propriétés mécaniques et électro-chimiques qui rendent leur emploi pertinent dans le cadre de nombreuses applications industrielles. Néanmoins, des difficultés apparaissent lors de la mise en forme à haute température de ces nuances. La littérature sur le sujet met en cause des interactions microstructurales, mal connues, liées à la nature biphasée de la microstructure. L'objet de ce travail est d'estimer l'influence que peut avoir la répartition des phases sur le comportement des polycristaux biphasés au cours d'une transformation finie à haute température. Pour ce faire, un modèle d'homogénéisation spécifique basé sur une formulation à deux transitions d'échelle et décrivant des situations morphologiques extrêmes est proposé afin d'estimer les différences de comportement mécanique susceptibles d'apparaître pour des répartitions de phase très différentes. Cette écriture s'intègre dans un cadre eulérien où le comportement viscoplastique non linéaire instantané est linéarisé à l'aide de la formulation variationnelle de Ponte Castañeda et où l'évolution microstructurale (fonction de corrélation à deux points, texture, écrouissage) est intégrée à chaque pas à travers l'utilisation de moyennes des champs mécaniques à l'échelle des orientations cristallines. Afin de tester l'adéquation de telles descriptions vis-à-vis du comportement réel des aciers inoxydables biphasés considérés, les prévisions sont confrontées à des caractérisations expérimentales à différentes échelles (essais de compression plane à chaud, extensométrie locale par micro-grilles à cœur, EBSD). Ces développements ne permettant de répondre que partiellement à la problématique, des approches alternatives sont également proposées afin de fournir des pistes d'amélioration pour la modélisation du comportement aux différentes échelles des polycristaux biphasés. Dans ce cadre, une estimation de type Hashin et Shtrikman à une transition d'échelle, basée sur un milieu de référence constitué des grains les plus déformés, est introduite en vue de rendre compte de façon plus conforme la localisation de la déformation mise en évidence par les mesures de champ. En outre, une quantification expérimentale de la contribution du glissement interphase est réalisée en étendant les techniques de micro-extensométrie classiques aux cas de discontinuités de déplacement locales.

RABAHALLAH Meziane, Université Paris 13 / ENSAM Metz

Directeurs de thèse : B. Bacroix, G. Ferron, S. Bouvier, T. Balan

Date soutenance : 22 octobre 2007

Titre : Modélisation de l'anisotropie plastique et application à la mise en forme des tôles métalliques

Résumé : Ce travail de recherche, réalisé au sein de deux laboratoires (LPMM à l'ENSAM de Metz et LPMTM à l'Université Paris 13), se propose d'étudier l'anisotropie plastique des tôles métalliques lors d'opérations de mise en forme. Les applications visées sont la prédiction, au moyen de la simulation numérique du procédé, de l'anisotropie plastique initiale et son influence sur le comportement global de la tôle. A cette fin, une large classe de potentiels plastique a été considérée. Des potentiels écrits dans le cadre d'une approche dite duale (moins couramment utilisée) où la grandeur introduite est le taux de déformation plastique, contrairement à l'approche classique où un critère est défini en contraintes. De plus, l'écroutissage du matériau a été pris en compte à travers l'introduction de variables internes. Une étude étendue a été consacrée à l'identification des différents potentiels introduits en se basant sur des données d'essais mécaniques, ainsi que sur les mesures de textures cristallographiques. Les matériaux étudiés à cet effet sont des nuances d'acier et des alliages d'aluminium (spécifiques aux matériaux employés dans le secteur automobile et aéronautique). Plusieurs stratégies d'identification ont été explorées afin d'examiner par la suite la sensibilité des prévisions numériques aux paramètres matériaux introduits. Pour permettre l'exploitation des différents potentiels dans le cadre de la simulation numérique des procédés de mise en forme, une implantation numérique robuste et efficace a été réalisée dans un code de calcul par éléments finis. Une routine de résolution du comportement suivant un schéma d'intégration implicite a été développée sous Abaqus via un module Umat en garantissant au mieux la précision des calculs, la convergence et la gestion des temps CPU. La modélisation a été appliquée à la prédiction du comportement anisotrope dans le cas de l'emboutissage profond de godet. Cette étude a mis en évidence la capacité de chaque potentiel à reproduire les fortes anisotropies de comportement des matériaux testés (prévisions de 4, 6, 8, 10... cornes d'emboutissage). Par la suite, l'application de cette modélisation à l'étude des cornes d'emboutissage a permis concrètement de voir les effets du potentiel sur le nombre de cornes formés, ainsi que sur leur position et degré de prononciation. La corrélation entre les coefficients d'anisotropie du matériau et les cornes d'emboutissage, a été systématiquement étudiée et confrontée aux prévisions analytiques des cornes. Une analyse fine en terme de distribution des épaisseurs, des champs de contraintes (retour élastique), des profils de cornes,... a été menée en corrélation avec les stratégies d'identification.

MEFTAH Salem, INSA Rouen

Directeurs de thèse : L. Taleb, F. Barbe, F. Sidoroff

Date soutenance : 26 octobre 2007

Titre : Modélisation de la plasticité due à une transformation martensitique dans un acier.

Résumé : Le travail porte sur l'analyse d'un phénomène particulièrement important dérivant des conséquences mécaniques des transformations de phases solide-solide : la plasticité de transformation ou TRIP (TRAnsformation Induced Plasticity) et son interaction avec la plasticité classique. Ce sujet est abordé à la fois par des investigations expérimentales et par une approche de modélisation numérique, pour les transformations martensitiques. La modélisation est basée sur le calcul par éléments finis des interactions mécaniques entre plaquettes de martensite et sa phase parente dans un domaine 2D représentant un grain d'austénite. Une première étude paramétrique détaillée est réalisée, en simulant une transformation martensitique dans l'acier 16MND5. La progression de la transformation est assurée par la formation successive des variants, sélectionnés selon un critère thermodynamique. Plusieurs sont testés et analysés (force motrice mécanique, énergie de déformation, énergie potentielle) en tenant compte de l'effet des principaux facteurs influant sur le TRIP (effet des efforts externes, pré-écrouissage de la phase austénitique ...). Les

résultats obtenus en terme de plasticité de transformation montrent que certaines configurations de cette approche (taille du maillage suffisamment grand, position et direction de cisaillement de la première plaquette bien définie, conditions aux limites, critères thermodynamiques...) permettent de représenter relativement bien l'évolution de la plasticité de transformation, surtout du point de vue qualitatif. Ceci est valable pour les essais de TRIP sous chargement durant la transformation, comme pour les essais d'interaction plasticité classique – TRIP, essais pour lesquels aucun modèle purement analytique ne s'est, à notre connaissance, montré prédictif. Afin d'améliorer ces résultats quantitativement, nous avons étendu la modélisation à l'échelle de plusieurs grains répartis périodiquement dans un domaine 2D (modèle multi-grains). Les premiers résultats sont encourageants, notamment par le fait que les simulations des essais de TRIP dans l'acier 35NCD16 montrent une nette amélioration de la cinétique de transformation et de l'allure de l'évolution du TRIP. Expérimentalement, nous avons réalisé des essais classiques de TRIP pour une transformation martensitique dans l'acier 35NCD16, sous différents modes de chargement (mono-axial et bi-axial) pendant la transformation. Nous avons constaté que la direction de chargement (traction, torsion ou combinaison des deux) n'influe pas sur le TRIP équivalent dans la mesure où l'équivalent au sens de Von Mises de la contrainte appliquée reste le même dans tous les essais. D'autres investigations expérimentales ont porté sur le phénomène d'interaction plasticité-TRIP mis en évidence dans les travaux de Taleb et Petit-Grostabussiat sur l'acier 16MND5. Ces nouvelles investigations, sur l'acier 35NCD16, ont permis de confirmer que le simple fait de pré-écrouir la phase austénitique pouvait conduire, sous chargement en contrainte nulle, à l'apparition d'une déformation permanente lors de la transformation, déformation apparentée à du TRIP. De même que pour l'acier 16MND5, ce TRIP dit d'interaction avec la plasticité de la phase parente apparaît dans la même direction et avec le même signe que le chargement ayant causé le pré-écrouissage.

DIAKHATE Malick, Université Limoges

Directeur de thèse : C. Petit

Date soutenance : 29 octobre 2007

Titre : Fatigue et comportement des couches d'accrochage dans les structures de chaussée.

Résumé : Cette thèse de doctorat s'inscrit dans le cadre d'un contrat de recherche entre EUROVIA, une société du groupe VINCI, et le laboratoire Mécanique et Modélisation des Matériaux et Structures du Génie Civil (3MsGC) de l'Université de Limoges. Les travaux réalisés dans ce travail visent à une meilleure connaissance du comportement mécanique des couches d'accrochage mises en oeuvre à l'interface de deux couches d'enrobés bitumineux. Afin de caractériser ce comportement, un large travail expérimental de laboratoire a été réalisé. Les résultats de cette campagne expérimentale ont permis d'alimenter le modèle éléments finis développé dans le but de prédire la durabilité du collage à l'interface des couches de chaussée. Ce modèle permet également d'étudier l'effet de la prise en compte ou non du comportement de l'interface sur le dimensionnement de la structure de chaussée. Afin de mener à bien la campagne expérimentale de ce travail, un prototype de dispositif d'essai a été conçu et réalisé. Au moyen d'une presse servohydraulique mono-axe, le dispositif d'essai permet d'appliquer une sollicitation de double cisaillement aux interfaces d'une éprouvette symétrique constituée de trois couches d'enrobés bitumineux. Ainsi, des essais monotones, oligocycliques et de fatigue ont été réalisés à 10°C et à 20°C sur une interface BBTM / BBSG, comportant ou non une émulsion à base de bitume pur. Les essais oligocycliques et de fatigue réalisés en mode de contrôle de force ont permis d'obtenir des résultats très satisfaisants, et très faiblement dispersés. Trois critères de rupture d'interface ont été analysés. Les lois de fatigue de la couche d'accrochage obtenues de ces critères sont comparées. Les

résultats d'essais ont permis de proposer une méthode permettant d'obtenir la loi de fatigue de l'interface à partir des résultats d'essais monotones de cisaillement. Cette campagne d'essais de cisaillement est complétée par une série d'essais monotones de torsion. Outre la caractérisation du comportement mécanique des couches d'accrochage, les résultats de la campagne expérimentale ont permis de déterminer les conditions expérimentales dans lesquelles les essais de cisaillement et de torsion sont corrélables. L'essai monotone de torsion présente l'avantage d'être réalisable sur chantier. Une dernière partie de ce travail est consacrée à la prise en compte du comportement mécanique de l'interface lors du dimensionnement de la structure de chaussée. Deux modèles éléments finis (en 2D et en 3D) sont développés pour étudier la réponse mécanique de la structure de chaussée sollicitée, soit par un effort normal (cas classique), soit par un effort normal et un effort tangentiel appliqués en surface.

THERY Pierre Yvan, Université Joseph Fourier

Directeur de thèse : M. Dupeux

Date soutenance : 29 octobre 2007

Titre : Adhérence de barrières thermiques pour aube de turbine avec couche de liaison β -(Ni,Pt)Al ou β -NiAl(Zr).

Résumé : Les systèmes barrière thermique sont utilisés en production depuis plus d'une quinzaine d'années pour protéger les aubes des turbines aéronautiques. Ce sont des systèmes multicouches composés d'une couche de céramique isolante déposée à la surface du superalliage constitutif de l'aube préalablement recouvert d'une couche de liaison qui assure la protection contre l'oxydation. La ruine de ces systèmes survient par écaillage de la couche de céramique. Ce phénomène complexe repose sur des mécanismes qui ne sont pas encore complètement connus ni maîtrisés.

Cette étude se propose de contribuer à l'amélioration de la compréhension de ces mécanismes de dégradations qui affectent l'adhérence des systèmes barrière thermique en service. A cette fin, une approche originale a été développée, avec la conception et la mise en œuvre d'un essai permettant d'évaluer quantitativement l'adhérence de systèmes barrière thermique et de suivre son évolution en oxydation cyclique à haute température. Les résultats des essais menés sur les systèmes étudiés sont discutés en fonction des évolutions microstructurales observées. Cette mise en relation permet d'identifier les dégradations critiques en terme d'adhérence.

Finalement, une approche énergétique de l'écaillage des systèmes barrière thermique est proposée. De cette approche découle la définition d'un critère d'écaillage qui donne une estimation de leur durée de vie. La validité et la pertinence de ce critère sont discutées dans le cas particulier des systèmes étudiés.

BURRY Pierre, Ecole Polytechnique

Directeur de thèse :

Date soutenance : 30 octobre 2007

Titre : Quelques techniques d'analyse mécanique pour les structures automobiles.

Résumé : Nous présentons dans cette thèse deux contributions à l'analyse mécanique des structures automobiles. La première partie du manuscrit est consacrée à la construction d'un élément fini enrichi de coque épaisse à quatre noeuds pour la modélisation des structures en tôles soudées par points. L'élément de base est un élément bilinéaire de coque à 4 noeuds ; le cisaillement dans le plan est géré par modes incompatibles, et le cisaillement transverse par contraintes de collocation discrètes. Dans cet élément, le concept de partition de l'unité est

utilisé pour enrichir par des solutions numériques pré-calculées de problèmes élémentaires l'approximation du champ des déplacements par les fonctions de forme des éléments finis. L'enrichissement proposé est construit séparément sur les champs de rotations et de déplacement normal à la coque. Pour des raisons de stabilité, le schéma de collocation doit être modifié et le nombre des points augmenté. Différentes combinaisons de fonctions d'enrichissement et schémas de collocation sont envisagées, et une technique par multiplicateurs de Lagrange est implémentée pour créer une liaison entre les modèles de tôles à la position des points de soudure. Dans la deuxième partie nous présentons des travaux relatifs à l'étude en fatigue de structures soumises à des chargements gaussiens. Une structure automobile par exemple subit des chargements aléatoires caractérisés par leurs distributions statistiques, et la réponse à ces chargements peut éventuellement être dynamique : la structure vibre et dans ces circonstances on parle de fatigue vibratoire. Les critères de fatigue de la littérature traitent en général des problèmes de fatigue sous chargements cycliques, et leurs expressions ne peuvent être appliquées directement au cas aléatoire. Sous les hypothèses de chargement gaussien stationnaire et de structure linéaire, nous proposons une formulation spectrale du critère de Dang Van. Nous avons établi des formules d'approximation au premier et au deuxième ordre pour évaluer la valeur du critère directement à partir des densités spectrales de puissance des contraintes dans le cas d'une structure quasistatique. Nous avons également proposé une approche pour traiter le cas d'une réponse dynamique. Des exemples industriels illustrent l'application de la méthode à des pièces automobiles. Enfin, les grandes lignes d'une méthode de construction d'une formulation spectrale d'un critère de fatigue générique sont exposées.

CHAUSSIDON Julien, ENSEEG

Directeurs de thèse : D. Rodney, M. Fivel

Date soutenance : 30 octobre 2007

Titre : Etude multiéchelle de la plasticité du fer-alpha à basse température ; application au clivage.

Résumé : Sous certaines conditions, un incident dans une centrale nucléaire peut mener à la rupture fragile par clivage de la cuve de refroidissement faite d'acier bainitique irradié. Pour comprendre l'origine de cette rupture, nous avons étudié la plasticité dans le fer Cubique Centré à basse température par des simulations numériques menées à différentes échelles. Des simulations de Dynamique Moléculaire ont confirmé la forte dépendance du glissement des dislocations vis en fonction de la température et de la contrainte. Les informations issues de ces simulations ont été complétées par des données expérimentales pour bâtir un code de Dynamique des Dislocations dédié à la structure Cubique Centrée à basse température. Ce code a été utilisé pour modéliser la plasticité développée dans une latte de fer-alpha sollicitée en flexion dans le but de prédire l'amorçage du clivage à différentes températures. La prise en compte d'une inclusion fissurée dans la latte est également abordée.

LECHAT Céline, Mines Paris

Directeur de thèse :

Date soutenance : 7 novembre 2007

Titre : Comportement mécanique de fibres et d'assemblages de fibres en polyester pour câbles d'amarrage de plates-formes offshore.

Résumé : Afin de développer les exploitations en eaux profondes, l'industrie pétrolière est confrontée depuis quelques années à la nécessité de modifier les systèmes d'amarrage de plate-forme classiques, habituellement constitués d'acier, pour avoir des systèmes plus légers.

Dans le cadre de cette problématique, cette étude s'intéresse au comportement mécanique de câbles synthétiques pour deux matériaux différents, l'un étant déjà utilisé en remplacement de l'acier, et l'autre étant potentiellement utilisable : le PET et le PEN.

Dans le but d'une caractérisation multi-échelle, des essais mécaniques (principalement traction, fluage et sollicitation cyclique) ont été réalisés sur des assemblages de taille variable, allant de câbles de plusieurs centaines de kN de force à rupture aux plus petits de leurs composants, les filaments. De fortes corrélations ont été observées entre le comportement quasi-statique des assemblages et celui des filaments, montrant que les effets de construction des assemblages sont limités et facilement identifiés. Le comportement des filaments est lui-même associé à des mécanismes se déroulant à l'échelle moléculaire. En revanche, les résultats obtenus sous sollicitation cyclique ont montré que la considération des mécanismes pouvant provoquer la rupture de filaments individuels (fluage, fatigue en tension, échauffement par hystérésis...) ne suffit pas à expliquer la rupture des câbles. Ceci implique l'intervention d'autres mécanismes, propres aux assemblages, du type abrasion.

La comparaison des résultats obtenus pour les deux matériaux a montré que le PEN, très peu étudié jusqu'à ce jour, présente un comportement mécanique très proche de celui du PET.

HENNINGER Carole, Université Paris VI

Directeurs de thèse : D. Leguillon, E. Martin

Date soutenance : 8 novembre 2007

Titre : Prise en compte des contraintes résiduelles dans un critère d'amorçage en rupture fragile

Résumé : Dans de nombreux assemblages de matériaux soumis à un chargement thermo-mécanique lors de l'élaboration ou en service, des contraintes résiduelles thermiques apparaissent, qui modifient les conditions d'amorçage des fissures. Si de plus l'un des composants a un comportement plastique, des déformations résiduelles plastiques peuvent à leur tour jouer un rôle. En mécanique de la rupture fragile, une des difficultés majeures concerne la prédiction de l'amorçage de fissures en l'absence de défaut initial. Leguillon a proposé un critère d'amorçage combinant une condition énergétique de type Griffith et une condition de contrainte maximum. La mise en oeuvre du critère fait intervenir les développements asymptotiques raccordés et la théorie des singularités. La bonne corrélation du modèle avec des mesures expérimentales pour les matériaux homogènes isotropes sous chargement mécanique pur a conduit à envisager l'extension du critère afin de prendre en compte des contraintes résiduelles. La comparaison du critère modifié avec des mesures expérimentales sur un assemblage aluminium/époxyde sous chargement thermo-mécanique se révèle satisfaisante quant à la prédiction de la rupture de l'interface entre les composants. Elle permet également de mettre en évidence, par inversion, une méthode d'identification des paramètres de rupture de cette interface. Le critère modifié est appliqué également à l'analyse de la décohésion tuile/structure dans les aiguilles formant le limiteur du tokamak Tore Supra. En effet, des contraintes résiduelles d'origine thermique et plastique apparaissent dans la partie métallique des tuiles de protection.

AVOINE Jérôme, Centrale Lille

Directeurs de thèse : G. Degallaix, P. Dufrenoy

Date soutenance : 9 novembre 2007

Titre : Analyse expérimentale et modélisation des couplages multiphysiques dans un contact flottant acier-matériau de friction modèle

Résumé : Cette étude concerne le freinage par friction et tout particulièrement les couplages entre les différents aspects physiques activés à des échelles différentes. Un accent particulier est porté sur la structuration des résultats d'essais par une approche globale, avec utilisation de l'outil numérique comme moyen de justification des hypothèses avancées. Après avoir posé la problématique du freinage au niveau scientifique en s'appuyant sur les aspects multi-physiques et multi-échelles, les outils expérimentaux et numériques utilisés sont présentés. Un matériau de friction modèle, de composition simplifiée, a été développé. Sa caractérisation a été entreprise en s'attachant à la mise en place d'indicateurs permettant de remonter aux températures locales de contact en freinage. Plusieurs campagnes d'essais de freinage de maintien ont été conduites sur un tribomètre instrumenté en particulier avec une caméra infrarouge et des accéléromètres. Les résultats ont été analysés finement en dégageant les couplages entre les phénomènes tribologiques, thermiques, mécaniques et physico-chimiques. Un ensemble d'organigrammes a été construit afin d'illustrer ces couplages. Il est montré en particulier que le couplage thermique-mécanique est prépondérant et qu'il évolue fortement avec le vieillissement du matériau permettant à d'autres couplages liés à la tribologie et à la dynamique de s'intensifier. Ceci ouvre de nombreuses perspectives académiques, grâce à la compréhension des mécanismes mis en jeu, et industrielles, par une démarche structurée de développement de matériaux de friction

POITOU Benoît, Université Bordeaux 1

Directeur de thèse : E. Martin

Date soutenance : 9 novembre 2007

Titre : Analyse de la fissuration au voisinage d'une interface dans les matériaux fragiles. Applications aux composites à matrice céramique et aux combustibles nucléaires

Résumé : Cette étude concerne la mise au point de critères prédictifs d'amorçage de fissures au voisinage d'une interface dans les bimatériaux fragiles. Le but est d'aider à l'élaboration de structures multicouches céramiques pouvant s'endommager progressivement en favorisant la déviation des fissures le long des interfaces entre couches. Plusieurs mécanismes de fissuration sont analysés comme la compétition entre l'amorçage d'une décohésion interfaciale et la rupture du second matériau en amont d'une fissure principale située dans la couche adjacente. Ce travail est ensuite appliqué pour décrire la déviation de fissure par une interface dans les composites à matrice céramique puis dans les combustibles de réacteurs nucléaires. Sur cette dernière partie, une campagne expérimentale est menée pour déterminer les paramètres matériaux nécessaires aux critères de déviation ; une optimisation de l'enrobage du combustible est enfin proposée afin d'accroître sa ténacité apparente.

MOKDAD Béchir, Université Joseph Fourier

Directeurs de thèse : A. Ammar, J.R. Clermont

Date soutenance : 13 novembre 2007

Résumé : Ce travail constitue une contribution à la simulation du comportement microscopique des polymères, dans le cadre de la théorie cinétique, en utilisant des nouvelles générations de techniques numériques de réduction dimensionnelle. En effet, la représentation discrète de fonctions dans des espaces de configurations probabilistes de dimensions très élevées (supérieure à 3). Dans ces espaces, toutes les méthodes déterministes actuelles (M.E.F, M.D.F ...) restent incapables de résoudre des équations de type Fokker-Planck décrivant l'évolution de la distribution de probabilité de la configuration microscopique.

Le premier chapitre consiste à tester la méthode des directions alternées (A.D.I) et la méthode de réduction dimensionnelle (P.O.D) pour simuler les modèles de la théorie cinétique dans le

cadre des polymères fondus. Ces méthodes combinent des problèmes de stockage des degrés de liberté à chaque pas de temps ainsi que des difficultés rencontrées dans le cas des modèles multidimensionnels de type multi-haltères. Nous avons orienté notre recherche vers une piste qui consiste à traiter les dimensions du problème de façon découplée : c'est la méthode de représentation en produit tensoriel de fonctions.

Le deuxième chapitre de ce travail a présenté un terrain d'application pour tester la méthode de représentation en produit tensoriel de fonctions dans différents cas issus de la théorie cinétique : modèle de suspension de polymères (haltère et multi-haltères), modèle de réseau de fibres, modèles de réseau de polymères, calcul transitoire, stationnaire, avec des conditions aux limites homogènes, non-homogènes, linéaire, non-linéaire, ...

Dans le troisième chapitre, la méthode de décomposition en produit tensoriel de fonctions a fait l'objet d'un couplage micro-macro pour l'étude des écoulements complexes dans le cadre de la méthode des tubes de courant (M.T.C). Ce couplage est réalisé en utilisant une description Eulérienne basée sur la méthode des tubes de courant pour la cinématique et le calcul de la fonction de distribution microscopique par écriture sous forme de produit tensoriel de fonctions sur ces lignes de courant. Donc, un couplage de deux échelles d'étude permettant de déduire l'influence de la structuration microscopique sur l'écoulement macroscopique.

TOUBOUL Marion, LMPM-ENSMA

Directeurs de thèse : A. Dragon, C. Nadot

Date soutenance : 13 novembre 2007

Titre : Approche multi-échelles morphologique et directe pour une classe de composites particuliers fortement chargés hyperélastiques et viscohyperélastiques.

Résumé : Cette thèse est consacrée à la modélisation par transition d'échelles du comportement non linéaire en grandes déformations d'élastomères très fortement chargés (propergols solides pour la propulsion spatiale). La transition d'échelles en question, qualifiée ici d'« Approche Morphologique » (AM), correspond à l'extension en transformations finies, réalisée par Guiot *et al.* (2006), des travaux de Christoffersen (1983). Elle repose sur une double schématisation géométrique et cinématique du composite permettant de rendre compte d'informations relatives à la morphologie et la répartition spatiale des charges, et offrant un moyen d'intégrer une certaine hétérogénéité de déformation dans la phase matrice dans l'estimation du comportement homogénéisé.

L'objectif des présents travaux est double : prouver l'applicabilité de l'AM à la viscohyperélasticité (comportement de la matrice des élastomères chargés) et évaluer quantitativement ses performances.

Pour traiter le premier point, l'AM est appliquée à un composite généré numériquement, constitué de grains répartis aléatoirement dans une matrice viscohyperélastique (loi à variables internes). On montre le caractère direct de la résolution du problème de localisation-homogénéisation y afférent grâce à un algorithme opérant dans l'espace-temps réel. Les résultats obtenus sont par ailleurs qualitativement corrects.

Concernant le second point, les effets des hypothèses cinématiques propres à l'AM et qui en constituent l'un des deux points de départ, sont testés au travers de comparaisons entre résultats (locaux et globaux) AM et Eléments finis (EF) sur des microstructures périodiques (simple et complexe). Ces dernières satisfont par construction les critères de la schématisation géométrique (pour éviter les erreurs induites par cette dernière). Le comportement des deux phases est considéré hyperélastique, de type Mooney-Rivlin compressible avec contraste pour les grains. Un certain nombre d'atouts et de points d'amélioration de l'AM sont ainsi dégagés. Une deuxième série de simulations, cette fois en affectant à la matrice la loi viscoélastique en

grandes déformations disponible dans ABAQUS, souligne les aptitudes de l'AM à traiter efficacement le couplage espace-temps et ses manifestations (effet mémoire longue).

Enfin, un programme transversal de confrontation des estimations à des résultats expérimentaux et à des calculs EF sur un propergol réel est amorcé. Chaque étape de la démarche est détaillée : essais sur composite et constituants, caractérisation morphologique par tomographie RX et recherche du VER « morphologique » du matériau, maillages EF automatiques des microstructures réelle et schématisée, détermination des VER « mécanique » relatifs aux deux méthodes (AM et EF). Les travaux correspondants déjà réalisés sont présentés de même que les premiers résultats de confrontation sur l'exemple d'un essai de compression hydrostatique. Ils s'avèrent encourageants. En particulier, la proximité des estimations EF et AM suggère d'améliorer la description du comportement des phases apparaissant comme la principale source d'écart avec la réponse macroscopique expérimentale. Enfin, des perspectives sont dégagées sur la suite des travaux d'identification et de validation ainsi que sur des aspects plus fondamentaux liés aux améliorations possibles de l'AM.

PRULIERE Etienne, Université Joseph Fourier

Directeurs de thèse : A. Ammar, N. El Kissi

Date soutenance : 14 novembre 2007

Titre : Modélisation de la microstructuration dans les polymères chargés - Application à la mise en forme

Résumé : Cette thèse étudie la possibilité de simuler des écoulements complexes (polymères chargés, suspension de fibres courtes, polymères) en prenant en compte la structure à l'échelle microscopique dans le cadre de la théorie cinétique. Il y a un couplage fort entre la structure microscopique et la cinématique à l'échelle macroscopique. Le caractère multidimensionnel de l'équation de Fokker-Planck décrivant la microstructure du fluide rend la simulation difficile avec des approches déterministes classiques. Pour palier ce problème, plusieurs méthodes visant à réduire les dimensions sont développées et testées.

Ces méthodes sont appliquées en particulier dans le cas des écoulements recirculants. Le cas d'une recirculation ajoute une difficulté supplémentaire car nous ne connaissons ni les conditions initiales, ni les conditions aux limites. Or les recirculations se trouvent dans beaucoup d'écoulements industriels, lors de la mise en forme des matériaux. Pour cette raison nous avons développé des méthodes numériques spécifiques à ce type d'écoulement.

Finalement, une partie de la thèse est dédiée à une étude expérimentale permettant de valider les résultats numériques obtenus et d'étudier les phénomènes physiques entrant en jeu dans la mise en forme des polymères chargés.

HADJ-SASSI Khaled, Ecole Polytechnique / EDF

Directeur de thèse : S. Andrieux

Date soutenance : 16 novembre 2007

Titre : Une stratégie d'estimation conjointe des paramètres et de l'état de structures à comportements non linéaires. Assimilation de données et erreur en loi de comportement.

Résumé : Un composant essentiel du parc de centrales nucléaires à eau pressurisée est l'enceinte en béton précontraint refermant le circuit primaire principal. Les enjeux de sûreté associés à ce composant amènent l'exploitant à mettre en oeuvre des instrumentations de suivi en service des caractéristiques géométriques de ces enceintes. Parallèlement de nombreuses études sont menées sur la simulation numérique de leur comportement à long terme (estimation des effets du fluage, risque de fissuration diffuse, analyse de l'évolution des

propriétés d'étanchéité, etc...). Les progrès réalisés depuis vingt ans dans le domaine de l'assimilation de données en météorologie ou en océanographie, ainsi que l'augmentation de la puissance des calculateurs, permettent d'envisager d'appliquer ces techniques au problème très fortement non linéaire d'estimation, et de correction des paramètres de modèles de béton à partir des données d'auscultation. L'objectif de ce travail est double, il s'agit en effet de :

- Fournir grâce aux techniques d'estimation, une suite temporelle d'états mécaniques tridimensionnels d'une enceinte, états déterminés au mieux à partir des données relevées et des données disponibles sur les sollicitations mécaniques et climatiques, et prenant en compte les incertitudes de modèles et de données.
- Déterminer un modèle mécanique général recalé d'enceinte permettant de réaliser des prévisions sur l'état mécanique futur à partir de divers scénarios de chargement (épreuves hydrauliques par exemple) ou de sollicitations climatiques (longues périodes de sécheresse), voire même d'inclure des scénarios de réparation ou de modification de la structure (peau interne par exemple).

Pour réaliser l'estimation conjointe de paramètres matériau, intervenant de façon non linéaire dans la réponse de la structure, et de l'état de la structure, une stratégie à deux niveaux a été élaborée. La première fait intervenir une approche variationnelle déterministe d'identification des paramètres basée sur une nouvelle erreur en énergie baptisée Erreur en Loi de Comportement Incrémentale. Tandis que la seconde est stochastique et est attachée aux techniques d'assimilation de données 4D-Var. La fonctionnelle d'Erreur en Loi de Comportement Incrémental a été développée pour l'identification de lois réversibles-dissipatives entrant dans la catégorie des matériaux standards. Elle regroupe toutes les informations contenues dans l'un ou l'autre des parties des équations constitutives pour contrôler explicitement l'ensemble des phénomènes dans lesquelles les paramètres matériaux interviennent. L'approche utilisée, sous sa forme variationnelle, consiste à exploiter l'information surabondante en surface (déplacement et tractions surfaciques) en introduisant deux couples de champs (déplacement, variables internes) chacun d'entre-eux résultant d'un problème direct d'évolution bien posé utilisant l'une ou l'autre des données surabondantes, et l'ensemble des données par ailleurs connues du problème. Les paramètres à identifier minimisent la nouvelle fonctionnelle en énergie construite à partir d'un écart entre ces deux champs solutions. Cet écart porte sur les incréments des champs de déformation et de variables internes et leurs quantités duales associées, en exploitant les propriétés variationnelles du problème d'évolution pour les matériaux standards en formulation implicite pure. Sa construction est basée sur l'inégalité de Fenchel et exploite les propriétés de convexité des potentiels d'énergie libre et de dissipation intervenant dans l'écriture des lois standards généralisées. Pour l'estimation conjointe de l'état et des paramètres matériaux, on s'est appuyé sur les techniques d'assimilation de données 4D-Var basées sur la théorie de contrôle optimal. Un nouveau terme permettant d'inclure les paramètres matériaux a été ajouté à la fonctionnelle de maximum de vraisemblance usuelle utilisée pour l'estimation de l'état à partir de mesures bruitées. Ce nouveau terme fait intervenir une ébauche sur les paramètres et une matrice de covariance associée qui définit la norme sur ces paramètres. Ces deux éléments essentiels à la phase d'assimilation de données sont cependant impossible à déterminer sur une base statistique. La première a donc été choisie en retenant les paramètres (optimaux) qui minimisent la fonctionnelle énergétique et la matrice de covariance a été construite à partir du Hessien de cette fonctionnelle d'erreur globale. Les propriétés de bon conditionnement et de convexité locale de cette fonctionnelle ont motivés ce choix. Cette stratégie hiérarchique a été mise en oeuvre dans le cas de matériaux visco-élastiques et sur des structures d'enceinte axisymétriques modélisées en éléments finis. L'algorithme d'optimisation retenu nécessite de déterminer les gradients de la fonctionnelle. Pour cela les techniques d'état adjoint ont été utilisées et ont donné lieu à une formulation générale de

problèmes adjoints pour les matériaux standards généralisés dont les potentiels sont réguliers. Le cas de potentiels non deux fois différentiables (qui permettent de modéliser par exemple ici des lois de fluage avec seuils) a également été abordé et implémenté.

MALESYS Nicolas, ENS Cachan

Directeurs de thèse : F. Hild, L. Vincent

Date soutenance : 16 novembre 2007

Titre : Modélisation probabiliste de la formation de réseaux de fissures par fatigue thermique.

Résumé : Des expertises sur des conduites de circuit de refroidissement de réacteur à l'arrêt de centrales nucléaires ont révélées la présence de réseaux superficiels de faïençage thermique. Ces réseaux de fissures ne présentent pas de réel danger pour la structure tant que les fissures ne traversent pas l'épaisseur des conduites, et créer ainsi des fuites dans les circuits de refroidissement. Aussi, afin de vérifier que ces réseaux ne sont pas critiques pour ce type de structure, un modèle probabiliste est établi afin de conforter les résultats expérimentaux déjà établis. Le modèle probabiliste se base sur deux principales hypothèses que sont la germination continue et le processus d'obscurcissement. La première hypothèse permet de prendre en compte le fait que les fissures ne s'amorcent pas toutes au début du chargement (germination instantanée) mais au cours des cycles. La loi d'amorçage des fissures est construite sur une loi de type Poisson-Weibull à trois paramètres prenant en compte la microstructure du matériau. D'autre part, le processus d'obscurcissement se base sur la présence de zone de relaxation de contraintes de part et d'autre des lèvres d'une fissure soumise à un chargement orthogonale à sa direction : si une fissure ou un site d'amorçage de fissure vient à se trouver dans une telle zone, la contrainte à laquelle est soumise la fissure ou le site devient trop faible pour assurer la propagation de la fissure ou l'amorçage d'une nouvelle fissure. La combinaison de ses deux principes permet de gérer les conditions d'amorçage, de propagation et d'arrêt des fissures. L'aspect probabiliste du modèle se fait uniquement en surface, car l'amorçage et l'arrêt des fissures a lieu uniquement sur la surface du domaine. Par contre, la propagation des fissures se fait en surface, d'abord dans une seule direction pour présenter les bases du modèle, puis dans toutes les directions dans la version finale du modèle, ainsi qu'en profondeur, suivent une direction orthogonale à la surface. La propagation des fissures est réalisée à partir du calcul des facteurs d'intensité des contraintes en pointe et en fond de fissure couplé à une loi de type Paris. Au final, le modèle permet de décrire la formation et la propagation de réseaux de fissures de fatigue thermique grâce à trois principales grandeurs : la probabilité d'obscurcissement, qui caractérise l'état de saturation du réseau, la densité de fissures activées, qui donne une information sur le nombre totale de fissures présentes dans le domaine, et la densité de fissures actives, qui permet de connaître le nombre de fissures qui continuent de se propager dans le réseau à un instant donné. Une autre information accessible par le modèle est la distribution des tailles de fissures arrêtées dans le réseau. Au final, l'étude de l'influence de nombreux paramètres permet de conclure que le modèle donne des résultats comparables aux résultats expérimentaux avec notamment une saturation du réseau de fissures au bout d'un certain nombre de cycles et un arrêt en profondeur des fissures, avec des profondeurs maximales de l'ordre de 3mm, valeurs comparables aux valeurs expérimentales.

SZMYTKA Fabien, Ecole Polytechnique

Directeurs de thèse : H. Maitournam, L. Remy

Date soutenance : 20 novembre 2007

Titre : Nouveaux modèles de comportement élasto-viscoplastique pour des matériaux métalliques. Application au dimensionnement de structures automobiles en fonte.

Résumé : L'objectif principal de cette étude est de proposer des lois de comportement macroscopiques permettant de décrire la viscosité de matériaux métalliques sur une large gamme de température et de vitesse de déformation. En effet, dans un contexte industriel fortement concurrentiel, le dimensionnement de structures comme le collecteur d'échappement des moteurs Diesel doit être rapide et prédictif. Les lois de comportement des matériaux jouent un rôle capital dans ce processus de dimensionnement. En effet, la multiaxialité et le caractère anisotherme des chargements appliqués aux collecteurs d'échappement induisent un comportement élastoviscoplastique du matériau et *in fine* de la structure. Bien qu'elles répondent aux principales exigences de coût, de masse et d'usinabilité, les fontes à graphite sphéroïdal, très souvent choisies comme matériau constitutif de ces pièces, ont un comportement complexe marqué par une très forte viscosité à hautes températures. Nous nous sommes donc attachés, au cours de cette étude, à constituer des bases expérimentales originales, composées d'essais (écrouissage cyclique, déformation progressive à vitesse constante ou Slow-Fast) qui ont permis de mieux comprendre le comportement de la fonte pour des températures variées (de l'ambiante à 700°C) et des niveaux de déformation multiples. En sollicitant le matériau sur de larges gammes de vitesses de déformation notamment inélastique, ils ont contribué à constituer une base de données souvent plus riche que celles que l'on trouve dans la littérature pour un nombre d'essais et donc un temps de développement réduit.

Deux modélisations ont été proposées pour décrire le comportement élastoviscoplastique d'une fonte à graphite sphéroïdal particulière : la fonte SiMo. La première d'entre elles se base sur un potentiel visqueux innovant décrivant l'évolution de l'écoulement à l'échelle macroscopique en s'inspirant de la physique à l'échelle des dislocations et de la plasticité cristalline. En combinant différents termes valant pour différents régimes de températures, elle a permis de bien décrire la majorité des essais d'écrouissage cyclique et notamment les cinétiques de relaxation. Constituée de 7 paramètres par température identifiée (soit un de plus que les lois utilisées jusqu'alors par PSA Peugeot Citroën), dont l'évolution avec la température est physiquement réaliste, elle ne permet toutefois pas de bien décrire les essais réalisés à vitesse lente ou pour de faibles niveaux de déformation. La seconde loi a donc été développée à partir du même potentiel visqueux enrichi pour réduire la viscoplasticité pour les faibles déformations. Couplée à un terme d'écrouissage isotrope, cette nouvelle loi d'écoulement a permis de corriger les principaux défauts de la première modélisation proposée ainsi que de bien décrire l'ensemble des essais de la base expérimentale. Composée de 11 paramètres, obtenus grâce à une stratégie d'identification adaptée et rapide, elle permet une très bonne description des phénomènes visqueux et est capable de reproduire des essais anisothermes représentatifs des sollicitations sur collecteur avec bien plus d'acuité que les lois de référence utilisées par PSA Peugeot Citroën. Les deux lois de comportement, dont l'admissibilité thermodynamique a été vérifiée, ont été intégrées dans un schéma de calcul de structure. Leur implémentation numérique est fondée sur un algorithme implicite de type retour radial permettant d'obtenir des temps de calcul compatibles avec les exigences des bureaux d'études. Ces modélisations ont ensuite été validées sur deux architectures de collecteur d'échappement et la faisabilité de calculs rapides de collecteur d'échappement sous chargement thermique transitoire a alors été démontrée.

MAZIERE Matthieu, Mines Paris

Directeurs de thèse : J. Besson, S. Forest, B. Tanguy

Date soutenance : 21 novembre 2007

Titre : Eclatement des disques de turbomachines.

Résumé : Lors du dimensionnement des turbomachines, les motoristes sont tenus par la réglementation de démontrer l'intégrité des pièces tournantes (disques et compresseurs) par un essai de survitesse : la pièce ne doit pas éclater sous l'effet du chargement mécanique et thermique avant la vitesse imposée par la réglementation. Cette exigence permet de garantir une marge de sécurité d'au moins 20 % entre la vitesse d'éclatement et les conditions normales de fonctionnement. L'évolution réglementaire permettra à terme d'utiliser des prévisions numériques préalablement validées par des essais. Les simulations, réalisées à l'aide de calculs élastoplastiques par éléments finis en grandes déformations, surestiment à l'heure actuelle la vitesse d'éclatement pour des pièces réalisées en Udimet 720, un super alliage à base de Nickel. Une prévision plus fiable de la vitesse d'éclatement nécessite une connaissance détaillée du comportement élasto-visco-plastique et du type de rupture du matériau. La prévision de la vitesse d'éclatement d'un disque en rotation est obtenue par analyse limite. Les paramètres du matériau influents sur cette vitesse limite sont dégagés dans cette étude. En conditions normales de fonctionnement, la température moyenne des disques est proche de 500°C. A cette température, l'effet Portevin Le Chatelier (PLC) apparaît lors d'essais de traction sur des éprouvettes en Udimet 720. La simulation de cet effet nécessite l'utilisation d'un modèle de comportement tenant compte du vieillissement dynamique. Ce modèle entraîne généralement une localisation de la vitesse de déformation sous forme de bandes. Une analyse de localisation a été effectuée dans le but d'utiliser ce modèle pour des disques en rotation. Il est démontré dans cette thèse deux résultats principaux au sujet de la simulation de l'éclatement des disques en Udimet 720 : (i) à la température ambiante, la vitesse d'éclatement est principalement influencée par le choix du critère de plasticité et par la contrainte limite à la rupture. (ii) à haute température (500_C), l'effet PLC change la réponse globale des disques sans pour autant modifier significativement leur vitesse d'éclatement. Cette thèse constitue le thème 3 du projet de recherche concerté entre Turboméca, l'Onera, Snecma et le Centre des Matériaux - Mines Paris - ParisTech intitulé "Durée De Vie". Ce projet est supporté financièrement par la DGA et la DPAC.

KAMINSKI Myriam, Mines Paris

Directeurs de thèse : L. Rémy, J.L. Chaboche, P. Kanouté

Date soutenance : 23 novembre 2007

Titre : Modélisation de l'endommagement en fatigue des superalliages monocristallins pour aubes de turbines en zone de concentration de contrainte.

Résumé : Les aubes de turbine Haute Pression des moteurs d'avion, constituées du superalliage monocristallin AM1, sont refroidies par un circuit complexe de microcanalisations. Ce réseau de perforations est situé en bord d'attaque et près du bord de fuite. Il peut constituer des sites privilégiés d'endommagement et d'amorçage de fissures qu'il est indispensable de prendre en compte dans le dimensionnement en fatigue des aubes de turbines.

Notre travail a consisté, dans un premier temps, à réaliser une étude expérimentale sur des éprouvettes perforées de trous de différents diamètres. Elle a permis de mettre en évidence qualitativement et quantitativement l'effet du gradient de contrainte sur l'amorçage de fissure (critère de longueur de fissure de 300µm). Cependant, la contrainte locale maximale (ou la déformation maximale) ne peut suffire dans un critère de rupture car elle surestime le risque de rupture, ne prenant pas en compte les effets d'échelle ou de géométrie. La voie que nous avons suivie pour intégrer ce dernier consiste, non pas à appliquer le modèle de durée de vie en tout point de la structure mais à utiliser, en pré-traitement, la moyenne volumique des

grandeurs nécessaires au calcul de la durée de vie sur un certain rayon d'intégration. Cette méthodologie a amélioré sensiblement les prévisions de durées de vie.

En parallèle, nous avons développé un modèle d'endommagement de fatigue anisotrope qui couple plasticité et endommagement en s'attachant tout particulièrement à décrire la phase de micro-amorçage. Le recours à des variables définies à l'échelle cristallographique implique, quant à la définition de l'endommagement, l'existence de systèmes endommageant, assimilés aux plans de glissement. Une formulation incrémentale du modèle est proposée. Elle consiste à coupler la loi de comportement inélastique et la loi d'endommagement, toutes deux exprimées de façon temporelle. Ce modèle rend également compte des effets de contrainte moyenne ainsi que des effets du temps au travers d'un dommage dû à l'oxydation. L'identification et la validation du modèle ont été réalisées à partir d'une base de données expérimentales conséquente sur l'AM1 et sur les essais sur éprouvettes perforées réalisés au cours de ce travail. Afin de prendre en compte les effets de gradient liés aux amorçages dans les zones à forts gradients ou de forte concentration de contrainte, la méthode de moyenne volumique a également été appliquée et a fourni des résultats encourageants.

MERKAK Othmane, INPG

Directeurs de thèse : A. Magnin, L. Jossic

Date soutenance : 23 novembre 2007

Titre : Hydraulique des suspensions dans un fluide à seuil d'écoulement

Résumé : Les applications industrielles mettant en œuvre des suspensions en fluides gélifiés dans leurs procédés de fabrication ou de traitement sont très nombreuses. Les principales industries concernées sont pour l'essentiel, celles du secteur pétrolier, de l'agroalimentaire, du bâtiment, de la cosmétique et de la pharmacie. La présente thèse a pour objectif de mieux comprendre le comportement des suspensions de particules solides dans des matrices fluides gélifiées. Des écoulements laminaires à faibles nombres de Reynolds avec des effets plastiques importants sont considérés. Les matrices fluides utilisées sont des gels viscoplastiques modèles finement caractérisés par rhéométrie rotative à vitesse imposée. Le glissement du fluide aux surfaces a été contrôlé. Les particules utilisées sont rigides, non colloïdales avec une granulométrie quasi mono disperse. Au repos, les particules ne sédimentent pas, elles sont stabilisées dans les matrices fluides. Avant de s'intéresser à l'hydraulique de ces suspensions, une étude des interactions entre deux particules mesurées par l'évolution de la traînée a été menée. Pour ce faire, la force de traînée s'exerçant sur deux sphères a été mesurée. Une corrélation permettant de prédire le critère de stabilité des particules en interactions a été proposée. L'étude du comportement rhéologique des suspensions en fonction de la concentration en particules solides et en fonction des propriétés des matrices fluides a été précisée. Dans la partie traitant de l'hydraulique des suspensions, les écoulements des suspensions dans une conduite cylindrique horizontale sont considérés. Cette partie débute par l'étude de la dynamique des particules dans un champ d'écoulement d'un fluide viscoplastique. Ensuite, les phénomènes de structuration des particules solides sous écoulement ont été étudiés. Les effets collectifs qui se présentent soit par la formation des chaînes de particules, soit par la collision entre les particules ont été précisés. Le cas de migration sous écoulement de fines particules de flottabilité nulle a été traité dans la dernière partie. Enfin, les mécanismes de sédimentation de particules de flottabilité non nulle ainsi que la prédiction du critère de stabilité des suspensions en écoulement ont été présentés.

SISKA Filip, Mines Paris

Directeurs de thèse : S. Forest, P. Gumbsch, D. Weygand

Date soutenance : 26 novembre 2007

Titre : Continuum vs. discrete dislocation dynamics modelling of mechanical behaviour of thin metallic films

Résumé : Le sujet de la thèse concerne l'étude de propriétés mécaniques des couches minces à base de cuivre. Ces propriétés sont étudiées à aide de la méthode élément finis dans le cadre de la plasticité cristalline classique et dans le cadre de la dynamique discrète des dislocations. Les simulations élasto-plastiques montrent que la présence des grains avec une orientation (001) et aléatoire augmentent les contraintes dans les grains adjacents d'orientation (111). La comparaison avec les résultats expérimentaux montre que le modèle n'est pas capable de prévoir des contraintes aussi élevées que l'écroutissage mesuré dans les expériences.

L'évolution de l'écroutissage, de la microdéformation plastique, de la rugosité locale et globale de la surface sont étudiées par les simulations de chargement cyclique d'agrégats polycristallins de cuivre. L'écroutissage et la rugosité saturent pendant le chargement. Il existe des régions où la déformation résiduelle cumulée et la rugosité locale évoluent pendant le chargement cyclique. Ces régions favorisent l'amorçage de l'endommagement. L'autre approche dans les simulations des agrégats polycristallins est représentée par la théorie de la dynamique discrète des dislocations. Les simulations montrent que l'influence principale est celle de la longueur initiale des sources. Par contre, l'épaisseur des films a peu d'influence sur le comportement du film dans le domaine étudié. Les dislocations sont plus actives dans les grains avec une orientation (001) et l'activité minimale est observée dans les grains avec une orientation (111).

XAVIER José, ENSAM Châlons

Directeurs de thèse : F. Pierron, S. Avril

Date soutenance : 27 novembre 2007

Titre : Identification de la variabilité des rigidités du bois à l'intérieur de l'arbre par la méthode des champs virtuels: application au *P. pinaster* dans le plan LR

Résumé : Dans ce travail, une approche inverse d'identification des paramètres de rigidité du bois a été étudiée et appliquée à l'essence pin maritime (*P. pinaster*) dans le plan LR. Cette approche est basée sur l'application de la méthode de champs virtuels (MCV) et sur la mesure de champs de déplacements sur une éprouvette parallélépipédique chargée avec le montage de cisaillement d'Iosipescu. Cet essai a été conçu afin d'activer l'ensemble des rigidités, générant des champs de déformation non homogènes. Ces champs ont été déduits à l'aide d'une méthode d'approximation polynomiale des champs de déplacement mesurés par la méthode de la grille. Les paramètres constitutifs ont ensuite été déterminés par la MCV. L'approche a été validée numériquement et expérimentalement. Deux configurations d'éprouvette avec le fil du bois orienté à 0° et à 45° ont été comparées. Avec la configuration à 0°, seuls les paramètres Q11 et Q66 (rigidités longitudinale et de cisaillement) ont été identifiés avec une dispersion acceptable. L'orientation à 45° a introduit une redistribution des champs de déformation permettant notamment une meilleure identification du paramètre Q22 (rigidité radiale ou transverse). Cette dernière configuration a été employée dans une étude concernant la variabilité radiale des rigidités à l'intérieur de la grume de l'arbre. Il a été constaté que Q22 et Q66 diminuent du centre à la moitié du rayon de la grume et augmentent après jusqu'à la périphérie.

PONCELET Martin, ENS Cachan

Directeurs de thèse : F. Hild, S. Calloch

Date soutenance : 30 novembre 2007

Titre : Multiaxialité, hétérogénéités intrinsèque et structurale des essais d'auto-échauffement et de fatigue à grand nombre de cycles

Résumé : Le contexte de l'étude est la relation liant essais d'auto-échauffement - c.a.d la variation de température d'une éprouvette sous chargement cyclique - et propriétés de fatigue des métaux. Un des intérêts majeurs de ces essais est qu'ils permettent, via des modèles appropriés, des prévisions pertinentes de propriétés à la fatigue à partir d'un très faible nombre d'éprouvettes et un très court temps d'essai. Deux directions de recherche - les chargements multiaxiaux d'une part, les effets de surface d'autre part - sont retenues dans le but d'étendre aux structures un modèle probabiliste unifiant auto-échauffement et dispersion de fatigue précédemment appliqué à des éprouvettes homogènes.

Tout d'abord des essais d'auto-échauffement de traction-torsion sur éprouvettes tubulaires sont réalisés, permettant de valider les prévisions thermiques de deux modèles multiaxiaux (l'un faisant l'hypothèse d'une activation microplastique par contrainte équivalente, l'autre par amplitude de cisaillement sur les plans critiques) dans le cas de chargements homogènes, hétérogènes, proportionnels et non-proportionnels. Trois séries d'essais de fatigue permettent par la suite de définir un domaine de validité pour les deux modélisations proposées. Celui basé sur une contrainte équivalente ne prévoit pas une limite d'endurance juste dans le cas de chargements non-proportionnels, tandis que celui basé sur une hypothèse de plan critique s'y révèle apte.

Une étude des effets de surface par essais d'auto-échauffement est ensuite proposée. Une différence notable de température moyenne peut être mesurée entre une tôle d'acier décarburées en surface et une non décarburée. Néanmoins le lien avec les propriétés de fatigue n'est pas explicite. Pour mieux comprendre le sens de cette mesure thermique moyenne dans le cas d'effet de surface, un protocole de mesure thermographique par microscopie infrarouge in situ est mis au point afin d'obtenir la variation de température dans l'épaisseur de la tôle. Le protocole proposé tend à diminuer de nombreux artefacts (thermiques, optiques) ainsi que les bruits de mesure, initialement plus importants que le signal cherché. Finalement des hétérogénéités de l'ordre de quelques milliKelvins à une échelle submillimétrique peuvent être mesurés, permettant une approche qualitative des effets de surface en jeu.

VASSAL Jean-Pierre, INPG

Directeurs de thèse : D. Favier, L. Orgéas

Date soutenance : 5 décembre 2007

Titre : Contribution à la modélisation des propriétés physiques et rhéologiques des milieux fibreux - Application à la mise en forme et aux propriétés thermiques des matériaux composites à fibres courtes

Résumé : Cette étude tente d'apporter des éléments de compréhension du fort couplage entre microstructure, mise en forme et propriétés d'usage des matériaux composites à matrice polymère fortement chargée de fibres courtes. La caractérisation du couplage « microstructure-mise en forme » est étudiée par des essais rhéologiques réalisés sur un rhéomètre à plateau transparent permettant d'observer l'évolution de la microstructure de composites modèles à matrice transparente. Les observations expérimentales sont confrontées à des modèles de la littérature de suspensions. Le couplage « propriétés d'usage-microstructure » est ensuite abordé dans le cadre des propriétés thermiques des composites conducteurs. Le comportement d'un enchevêtrement de fibres très conductrices est étudié

avec la méthode d'homogénéisation par développements asymptotiques à échelles multiples, de laquelle sont extraites des formulations discrètes des problèmes de localisation. Ces derniers sont implantés dans un code de calcul de type éléments discrets. Un modèle analytique est alors proposé, comparé aux simulations discrètes, puis validé expérimentalement sur des composites modèles.

MOULART Raphaël, ENSAM Châlons

Directeurs de thèse : F. Pierron, R. Rotinat

Date soutenance : 6 décembre 2007

Titre : Développement et mise en oeuvre d'une méthode de mesure de champs de déformation à l'échelle micrométrique

Résumé : Ce travail de thèse présente la mise au point d'une méthodologie de mesure de champs de déformations planes à l'échelle micrométrique. La mesure cinématique est faite par une méthode de grille qui analyse les déformations d'un réseau périodique attaché à la surface à étudier. Les grilles ont été réalisées par photolithographie interférentielle directe. Pour l'observation et la numérisation des réseaux, le choix s'est porté sur la microscopie interférométrique en lumière blanche qui donne accès à la topographie 3D de la surface d'intérêt. Une étude de bruit a permis d'optimiser la réalisation des réseaux pour l'application mécanique auxquels ils étaient destinés. Par ailleurs, l'application de déplacements de corps rigide a permis de mettre en évidence un problème de corrélation spatiale de ce bruit qui ne pouvait être ignoré. Ainsi, et en apportant un soin particulier sur la réalisation expérimentale des essais mécaniques, la résolution en déformation obtenue est de l'ordre de 1 à 2×10^{-3} pour une résolution spatiale d'environ $20 \mu\text{m}$. Une première application concernant l'étude des déformations élasto-plastiques d'un acier ferritique a permis de valider la présente méthode, de l'étendre à l'étude de régions d'intérêt de plus grandes tailles et d'en souligner les points forts mais aussi les limites.

LATOURTE Félix, Université Montpellier

Directeurs de thèse : A. Chrysochoos, S. Pagano, B. Wattrisse

Date soutenance : 10 décembre 2007

Titre : Identification des paramètres d'une loi élastoplastique de Prager et calcul de champs de contrainte dans des matériaux hétérogènes

Résumé : Cette thèse porte sur l'identification de comportements élastoplastiques ou élastiques hétérogènes à partir de mesures de champs cinématiques au moyen de fonctionnelles de type erreur en relation de comportement (ERC). Elle fait suite aux travaux de G. Geymonat, S. Pagano et F. Hild sur l'identification de propriétés élastiques par approche variationnelle. La méthode d'identification développée dans le cadre de cette thèse a été appliquée à diverses situations mécaniques, pour des données simulées ou issues d'expérimentations. Pour ces expérimentations, les champs de déplacement sont obtenus par corrélation d'images numériques. Les applications présentées concernent l'identification de propriétés élastiques hétérogènes, l'estimation de puissances mécaniques localement fournies lors d'essais de fatigue à grand nombre de cycles, et l'identification de propriétés élastoplastiques hétérogènes.

LAZAR-SPALATELU Mirela, Institut JLRA

Directrices de thèse : F. Léné, N. Turbé

Date soutenance : 10 décembre 2007

Titre : Modélisation non linéaire et calcul de membranes sous pression. Application à la conception et à l'optimisation de voiles de bateaux

Résumé : L'étude présentée s'est donnée pour objectif de mettre les moyens numériques modernes d'aide à la conception des structures au service des industriels de la navigation de plaisance afin d'améliorer la sécurité et les performances des voiles de bateaux. Dans ce but, nous avons mené un travail à caractère exploratoire, résumé dans ce mémoire comportant quatre parties. La première consiste à proposer une modélisation du comportement mécanique d'une voile assimilée à une membrane orthotrope, prétendue, siège de grands déplacements et petites déformations. Une analyse mathématique du problème non linéaire qui résulte de cette approche est réalisée dans un deuxième temps: une adimensionnalisation des équations met en évidence la présence d'un petit paramètre (rapport pression exercée/coefficients d'élasticité des matériaux utilisés) qui, sous certaines hypothèses, permet de démontrer existence et unicité d'une solution. La résolution numérique du problème est abordée en troisième partie: elle est effectuée, sous MATLAB, par une méthode itérative de type Newton-Raphson modifiée. La convergence de l'algorithme est attestée par le nombre réduit d'itérations nécessaires à l'obtention de résultats. Enfin, des progrès récents dans la technologie de fabrication des voilures ont conduit à envisager un problème d'optimisation relatif à la déformation de la voile dans le sens transverse. Le paramètre de conception considéré est l'orientation des fibres. L'algorithme d'optimisation choisi, celui de Nelder-Mead, converge rapidement et fournit des résultats en bonne cohérence avec l'expérience.

EL BARTALI Ahmed, Centrale Lille

Directrices de thèse : S. Degallaix, V. Aubin

Date soutenance : 13 décembre 2007

Titre : Apport des mesures de champs cinématiques à l'étude des micromécanismes d'endommagement en fatigue plastique d'un acier inoxydable duplex

Résumé : L'objectif du présent travail est double : d'une part mettre au point un dispositif de microscopie in situ qui permette de faire des observations de l'endommagement de surface en fatigue d'une éprouvette standard en acier duplex, à l'échelle de la microstructure (images de $120 \times 90 \mu\text{m}^2$), en cours d'essais ; d'autre part acquérir régulièrement des images durant le cyclage à l'aide de ce dispositif, afin d'analyser l'endommagement grâce aux champs cinématiques calculés par corrélation d'images numériques (CIN) (logiciels CORRELI^{LMT} et CORRELIQ4). Des observations de surface permettent d'identifier et de suivre le développement et la localisation de la déformation plastique cyclique, d'identifier les sites d'amorçage des microfissures et de suivre la propagation des microfissures en surface. Ces observations, associées à des analyses EBSD, permettent d'identifier les systèmes de glissement activés dans chaque phase. Des mesures de relief de surface par profilométrie interférométrique permettent de caractériser la morphologie des marques de glissement apparues en surface. La texture de niveaux de gris de l'image, nécessaire à la CIN, est obtenue par attaque électrochimique. Les champs mesurés mettent en évidence les hétérogénéités de déformations à l'échelle des grains, le niveau des déformations plastiques cumulées et leur dispersion, dans chacune des phases. Ils permettent par ailleurs de détecter les sites probables d'amorçage des microfissures, bien avant leur observation. L'étude montre la complémentarité des diverses techniques utilisées, et en particulier l'intérêt des mesures de champs à l'échelle de la microstructure, vis-à-vis de la compréhension de l'endommagement en fatigue plastique

oligocyclique dans le matériau biphasé qu'est l'acier duplex (taille de grain de l'ordre de 10 μm).

SICHAIB Abdelghani, CSTB

Directeur de thèse : H. Boussa

Date soutenance : 13 décembre 2007

Titre : Comportement Mécanique de chevilles de fixations sous sollicitations accidentelles de type sismique

Résumé : La présente étude vise à apporter de nouveaux éclaircissements quant au comportement des chevilles de fixations sous sollicitations de type sismique. La modélisation menée inclut le comportement endommageable du béton, la plasticité des chevilles, le contact-frottement entre composants de la cheville et entre béton et cheville, ainsi que les grands déplacements. La dégradation du béton est simulée par le modèle d'endommagement MODEV du CSTB qui a été adapté aux chargements cycliques, en modifiant ses critères et en identifiant ses paramètres pour améliorer l'estimation de l'énergie de fissuration et les déformations résiduelles. Le modèle a été par la suite implémenté dans le code aux éléments finis CASTEM. Afin de simuler l'interface cheville-béton et l'interface entre les composants de l'ancrage, le contact unilatéral avec frottement de Coulomb a été pris en compte. L'effet de la forme de la douille, de l'angle d'expansion de la cheville, du coefficient de frottement ainsi que le positionnement de la cheville dans un massif en béton (*bord, pleine masse*) et la forme de la cheville (*hauteur effective, diamètre*) ont été mis en évidence sous chargements statiques (*arrachement, cisaillement*). Par la suite l'effet du nombre de cycle ainsi que la forme de la cheville a été montré sous arrachement et cisaillement cycliques. Les résultats obtenus relatent les observations relevées en essais. Finalement des simulations effectuées sur une cheville sollicitée par des signaux synthétiques nous permettent d'avoir une estimation de la fréquence, du nombre de cycles et de l'intensité de chargement à utiliser dans de futurs essais. Cette approche incluant l'interaction de différents phénomènes nonlinéaires et des paramètres de chargement apporte finalement de nouveaux éléments pour aider à la proposition d'une procédure de caractérisation des chevilles sous sollicitations sismiques.

BERTHEL Bruno, Université Montpellier

Directeurs de thèse : A. Chrysochoos, B. Wattrisse

Date soutenance : 14 décembre 2007

Titre : Mesures thermographiques de champs de dissipation accompagnant la fatigue à grand nombre de cycles des aciers

Résumé : Cette étude s'inscrit dans une démarche originale consistant à développer un protocole expérimental adapté aux essais de fatigue à grand nombre de cycles permettant de dresser des bilans locaux d'énergie en s'appuyant sur des techniques d'imagerie quantitative. Les objectifs étaient de compléter et de valider une méthode de traitement d'images infrarouges permettant d'étudier séparément les mécanismes dissipatifs et les effets thermoélastiques accompagnant la fatigue à grand nombre de cycles des aciers. Un point intéressant de cette méthode est de pouvoir fonctionner alors que les amplitudes des sources thermoélastiques sont très nettement supérieures aux intensités de dissipation. Le deuxième objectif était d'arriver à combiner cette technique infrarouge avec celles mises en place pour accéder aux champs cinématiques par une méthode de corrélation d'images. Ce rapprochement a permis d'estimer l'énergie de déformation localement mise en jeu et de la comparer, sur un cycle de chargement, à l'énergie dissipée.

MAREAU Charles, ENSAM Metz

Directeurs de thèse : M. Berveiller, V. Favier

Date soutenance : 19 décembre 2007

Titre : modélisation micromécanique de l'échauffement et de la microplasticité des aciers sous sollicitations cycliques

Résumé : La rupture en fatigue à grand nombre de cycles est une des sources de défaillance les plus fréquentes pour des pièces en service. Dans le cas des aciers, l'endommagement par fatigue trouve ses origines microstructurales dans des mécanismes liés aux mouvements des dislocations. L'objectif du présent travail est de comprendre les multiples interactions entre la microstructure et la dissipation intrinsèque induite par les mouvements de dislocations puisque limiter la dissipation semble permettre d'améliorer la limite de fatigue. L'estimation expérimentale de la dissipation intrinsèque à partir de la température nécessite une formulation de l'équation de la chaleur qui découle d'hypothèses relatives aux sources de chaleur et aux moyens de mesure. L'outil expérimental permet de mettre en place un modèle micro-macro qui décrit les multiples interactions entre les phénomènes dissipatifs et la microstructure. Lors de sollicitations cycliques, la dissipation est supposée être soit liée à la courbure des lignes de dislocations (anélasticité) soit due au glissement viscoplastique des dislocations (inélasticité). L'utilisation du cadre de la plasticité cristalline aboutit à une description physique de ces mécanismes et le modèle de transition d'échelle, développé pour tenir compte des différents ordres de dérivation qui interviennent dans la loi de comportement locale, permet de considérer la nature hétérogène des aciers. Une procédure d'identification des paramètres basée sur les courbes de comportement oligocyclique est ensuite proposée afin de comparer les résultats du modèle à des données expérimentales. Finalement, le modèle est principalement utilisé afin de prévoir le rôle divers paramètres relatifs au chargement ou à la microstructure sur les courbes d'échauffement.