

Habilitations à diriger des recherches

SAUZAY Maxime, CEA

Date soutenance : 3 juin 2009

Titre : Micromécanique des polycristaux soumis à de faibles déformations

Résumé : De nombreux composants des centrales nucléaires sont sollicités à de faibles amplitudes de chargement et les durées de vie se comptent en dizaines d'années. En fluage à long terme, en fatigue à grand nombre de cycles et en corrosion sous contrainte, le stade d'initiation des fissures (pendant lequel elles ne sont détectables que grâce à la microscopie) représente de l'ordre de 80% de la durée de vie. La taille caractéristique de la microstructure est alors non négligeable devant celle des fissures. Les dispersions des durées de vie observées en laboratoire sont souvent considérables, en partie du fait du caractère aléatoire de la microstructure. Enfin, les extrapolations fondées sur les modèles macroscopiques identifiés sur une base nécessairement restreinte de résultats expérimentaux s'avèrent peu fiables. Nos activités scientifiques visent à mieux comprendre et modéliser les mécanismes de plasticité et d'endommagement des polycristaux métalliques soumis à de faibles déformations, principalement en fatigue et fluage long terme. Trois thématiques sont plus particulièrement développées : distribution des champs mécaniques dans les polycristaux soumis à de faibles déformations, localisation de la déformation à l'échelle des grains et enfin adoucissement des aciers martensitiques soumis à des chargements cycliques et/ou de fluage. Chaque thématique est abordée de la manière suivante :

- étude de la microstructure et des mécanismes de déformation et d'endommagement (essais, observations microstructurales en collaboration avec mes collègues du CEA-SRMA et d'autres laboratoires)
- modélisation des mécanismes. Les outils utilisés sont la mécanique des milieux continus, l'élasto-plasticité cristalline, le calcul par éléments finis (introduction/développement dans le code Cast3m de procédures issues d'une collaboration initiale LPMTM-CEA-LMS), la théorie des dislocations et de la diffusion (lacunes, montée)
- validation à l'échelle macroscopique et microscopique afin de vérifier la pertinence des prédictions en se référant à des mesures et observations expérimentales.

Les trois thématiques de recherche permettent d'illustrer cette démarche :

- distribution des champs mécaniques dans les polycristaux soumis à de faibles déformations. L'anisotropie du comportement des grains d'un polycristal génère l'apparition de champs mécaniques hétérogènes. Pour les polycristaux soumis à de faibles contraintes, deux sources d'anisotropie locale sont a priori influentes : l'élasticité et la plasticité cristallines. L'influence de l'élasticité cristalline est étudiée à l'aide de calculs par éléments finis cristallins sur des maillages d'agrégats 3D. Les distributions des facteurs de Schmid effectifs (rapports entre les cisssions calculées dans les grains et la contrainte de traction macroscopique) sont calculées pour de nombreux métaux. Même pour des métaux aussi usuels que le nickel, le cuivre ou l'austénite, elles diffèrent notablement de la distribution classique des facteurs de Schmid (obtenue en supposant la contrainte homogène). La dispersion liée aux orientations aléatoires des grains voisins est aussi élevée que celle liée à l'orientation du grain elle-même. La déformation plastique macroscopique au-delà de laquelle l'élasticité cristalline peut être négligée est évaluée en fonction de l'écroutissage macroscopique. Ces résultats expliquent certaines observations de la littérature (variabilité de la microstructure de dislocations et de la sensibilité à la fissuration pour une même orientation cristalline à cause des effets de grains voisins) et améliorent les prédictions existantes (mesures des fractions de grains déformés plastiquement selon la déformation appliquée). Nous pouvons alors prédire les évolutions des densités de microfissures en cours de chargement cyclique et des réseaux de microfissures en fatigue thermique (aciers austénitiques inoxydables)
- à une échelle plus fine, la localisation de la déformation est souvent observée dans polycristaux métalliques (bandes de glissement persistantes en fatigue, bandes claires lors de la

déformation d'aciers austénitiques pré-irradiés...). Nous avons étudié par calcul par éléments finis cristallins les interactions entre ces bandes fines très déformées et une surface libre ou un joint de grains. Des formules analytiques sont déduites de manière à évaluer aisément les glissements en surface et en profondeur. Les paramètres les plus influents sont le rapport d'élanement des bandes (rapport entre longueur et épaisseur), la limite d'élasticité de la matrice et les orientations des grains voisins. Les valeurs des glissements calculés et mesurés sont en accord raisonnable (microscopie à force atomique, MET). Les concentrations de déformation en surface et de contrainte aux joints de grains sont notablement élevées. Elles favorisent l'initiation et la propagation des fissures en fatigue et en corrosion sous contrainte des polycristaux préalablement irradiés ou déformés

- certains mécanismes de plasticité ou de microfissuration requièrent de s'intéresser à une échelle encore plus petite : celle du joint de grains dont l'épaisseur est de l'ordre de 1nm. Ainsi, l'adoucissement en chargement cyclique et en fluage des aciers martensitiques et la propagation de microfissures de fatigue dépendent de la nature des joints de grains en présence. Pour des sollicitations cycliques à haute température, nous avons montré que l'adoucissement était porté par la composante cinématique de la contrainte (contraintes à longue portée). Des observations microstructurales (Microscopie Electronique en Transmission (MET ou TEM), et EBSD) mettent en évidence la disparition de joints faiblement désorientés à l'intérieur des blocs fortement désorientés et la diminution des densités de dislocations. Ces phénomènes ont été quantifiés. Des sollicitations cycliques largement en-dessous de la limite d'élasticité conduisent aussi à un adoucissement et une évolution microstructurale notable, ainsi qu'une accélération de la vitesse de fluage. Un modèle d'annihilation entre dislocations mobiles et dislocations des sous-joints est proposé et appliqué à des chargements cycliques et/ou de fluage. Les comparaisons entre prédictions et mesures (histogrammes de désorientations et tailles de micro-grain) sont encourageantes. Dans les années à venir, nous tenterons de développer la prédiction de réseaux de microfissures de fatigue et la simulation de la propagation de ces fissures notamment en interaction avec les joints de grains. Les effets de la localisation sur les concentrations de contraintes aux joints de grains seront étudiés en détails afin de mieux comprendre les mécanismes d'endommagement intergranulaire observés en corrosion sous contrainte ou en fatigue. Enfin, les modèles d'homogénéisation en champ moyen de la littérature seront aussi développés en chargement cyclique et en régime élasto-visco-plastique afin d'améliorer les prédictions du comportement macroscopique en fatigue-relaxation et fatigue-fluage. Les modèles d'adoucissement induit par la déformation à haute température des aciers martensitiques pourront alors aider à améliorer les prédictions de striction et de ruine des éprouvettes sollicitées en fluage.

BRACCINI Muriel, INPG

Date soutenance : 29 juin 2009

Titre : Adhérence aux interfaces : couplage physico-chimie/mécanique

Résumé : La réalisation d'objets complexes nécessite souvent l'assemblage d'éléments constitués ou non du même matériau. Les interfaces au sein de ces multi-matériaux ont des fonctions structurales ou fonctionnelles, mais dans les deux cas elles doivent résister aux conditions d'usage. Cette propriété de résistance peut être mesurée par l'énergie d'adhérence, définie comme la résistance d'une interface aux sollicitations mécaniques tendant à sa décohésion. A travers différentes études que j'ai abordées, bien que celles-ci concernent des systèmes différents, un certain nombre de paramètres sont récurrents quant à leur influence notable sur l'adhérence d'une interface. De plus, suivant les conditions d'usage du système, ces paramètres vont évoluer au cours du temps, modifiant ainsi la tenue de l'interface. On cherche en général à maintenir une durabilité de l'adhérence, cependant dans certaines applications, la dégradation de l'interface peut permettre une réversibilité de son adhérence, utile dans des procédés de transfert ou de recyclage.

NEUKIRCH Sébastien, Université Paris VI

Date soutenance : 30 juin 2009

Titre : Enroulement, contact et vibrations de tiges élastiques

Résumé : Ce mémoire présente plusieurs études sur l'équilibre, la stabilité et les vibrations de poutres élastiques en grande rotation. Le modèle utilisé est d'abord présenté de deux manières différentes : les équations de Kirchhoff sont introduites (i) comme une théorie directe de Cosserat, (ii) par une approche asymptotique 3D->1D. Une étude relativement complète des équilibres avec et sans auto-contact d'une poutre sous contrainte de tension et torsion et encastree en ses deux extrémités est ensuite exposée. Le modèle est d'autre part appliqué au sur-enroulement de la molécule d'ADN et aux expériences sur molécule individuelle. Le cas d'une poutre naturellement courbe enroulée autour d'un obstacle cylindrique est ensuite traité. Les équations d'équilibre obtenues sont appliquées au cas d'une plante grimpante autour d'un tuteur ainsi qu'aux configurations dimériques de la protéine kératine. Enfin la dynamique d'une poutre plane est analysée sous deux angles différents : (i) le relâchement d'une poutre console qui donne lieu au phénomène de renforcement de courbure, et (ii) les vibrations d'une poutre post-flambée, encastree en ses deux extrémités, avec comparaison des cas extensibles et inextensibles. La conclusion mentionne quelques problèmes d'intérêt qui seront l'objet d'études futures.

NADOT-MARTIN Carole, ENSMA Poitiers

Date soutenance : 3 juillet 2009

Titre : Vers une modélisation micromécanique directe du comportement non linéaire d'élastomères fortement chargés (composites énergétiques et propergols solides).

Résumé : Les travaux présentés traitent essentiellement de la modélisation multi-échelles du comportement non linéaire de composites particuliers fortement chargés utilisés dans les secteurs de la défense et de la propulsion spatiale. Ils s'inscrivent dans le contexte plus large des études de vulnérabilité aux agressions accidentelles ou malveillantes. Il s'agit de construire un outil qui puisse ultérieurement aider à la compréhension et à la modélisation des mécanismes d'initiation d'une réaction pyrotechnique, ces derniers étant essentiellement gouvernés par les processus dissipatifs et les caractéristiques de l'endommagement à l'échelle microstructurale. La présentation des travaux de modélisation est volontairement abordée depuis leur cadre d'application. Une première partie se focalise ainsi sur une présentation des composites énergétiques sous l'angle « matériau » (composition, mode d'élaboration, comportements mécanique et réactif) avant d'aborder une synthèse des enjeux en homogénéisation non linéaire permettant de justifier le choix de l'approche retenue au démarrage des travaux, et de la positionner par rapport aux méthodes récentes. La multiplicité des non linéarités des composites énergétiques, leur spécificité morphologique entre autres caractérisée par un très fort taux de charges (60 à 90 % en masse), et l'exigence d'accès à des estimations locales ont conduit à retenir une méthode d'estimation plutôt « atypique » proposée en élasticité linéaire par Christoffersen dans les années 80. Qualifiée ici d'« Approche Morphologique » (AM), on présente les extensions non linéaires progressives dont elle a fait l'objet : extensions en viscoélasticité linéaire, puis en transformations finies (hyper et viscohyperélasticité), et enfin en présence d'endommagement par décohésion liant/charges (en HPP dans ce cas, et via l'adjonction de trois critères d'évolution formulés à l'échelle locale). Grâce à une schématisation microstructurale explicite -dans laquelle chaque grain et zone de matrice intergranulaire sont représentés- couplée à une description cinématique linéaire par morceaux, l'AM permet d'accéder à une estimation des champs locaux et des caractéristiques morphologiques des éventuelles décohésions. Les résultats en présence d'endommagement illustrent en effet les aptitudes de l'approche à décrire l'évolution de la réponse homogénéisée, notamment celle de son anisotropie, en fonction des événements discrets se produisant à l'échelle inférieure, nucléations, fermeture, réouvertures de défauts dont on peut visualiser simultanément la position et les caractéristiques au sein de la microstructure. De façon plus large, à travers la présentation des différentes extensions non linéaires réalisées, on discute de la nature spatio-temporelle des interactions locales prises en compte en viscoélasticité, des fluctuations des champs (inexistantes dans les grains, mais dans la matrice fonctions de la morphologie locale et renforcées

par les éventuels défauts d'interface), de l'aspect direct de la résolution (sans linéarisation préalable des lois locales et dans l'espace temps réel). Des confrontations des estimations aux deux échelles à des résultats numériques de référence issus de calculs par Eléments Finis viennent alimenter la discussion avec pour but d'évaluer la pertinence des hypothèses cinématiques au départ de l'approche. Une première confrontation transversale AM/EF/Expérience sur un propergol réel est également présentée avec des résultats prometteurs. Enfin, un bilan des atouts et des limites de l'AM vis-à-vis des exigences du cahier des charges initial permet de hiérarchiser les travaux à venir.

BALAN Tudor, ENSAM Metz

Date soutenance : 14 septembre 2009

Titre : Mise en forme des tôles métalliques : interactions entre modélisation du comportement et simulation du procédé

Résumé : La modélisation, puis la simulation numérique de la mise en forme des tôles métalliques ont déjà mobilisé les efforts de nombreux chercheurs pendant plusieurs décennies. Cependant, l'avènement de nouveaux matériaux à fort potentiel d'allègement pour l'automobile - aciers à très haute résistance, alliages d'aluminium, magnésium - a mis en défaut bon nombre de modélisations et d'essais expérimentaux existants. D'autre part, les progrès enregistrés par les moyens de calcul et les logiciels permettent aujourd'hui d'aller beaucoup plus loin dans l'intégration des modèles et de la simulation numérique, ainsi que dans leurs applications à de nouveaux procédés de formage industriels. Mes travaux de recherche concernent essentiellement la prise en compte de lois de comportement phénoménologiques avancées dans la simulation numérique de la mise en forme des tôles métalliques. Le manuscrit se focalise plus particulièrement sur la modélisation de l'anisotropie plastique des tôles orthotropes à l'aide de potentiels plastiques et les problèmes numériques que cette modélisation soulève : identification paramétrique, intégration temporelle du modèle de comportement élasto-plastique, application aux procédés de mise en forme. Une généralisation des potentiels plastiques anisotropes utilisant des transformations linéaires est présentée et analysée en détail, notamment l'effet de l'augmentation du nombre de transformations sur la qualité des prédictions et l'identification basée sur un modèle polycristallin. Une attention particulière est accordée à l'impact de la modélisation et de l'identification paramétrique sur les résultats de simulation. Pour certaines applications l'effet du modèle est notable, surtout lorsque l'on s'intéresse à la prédiction des défauts (retour élastique, limites de formage) pour des simulations « sévères » (petits rayons, forte épaisseur...). Cependant, la prise en compte de modèles de comportement avancés implique un effort considérable de point de vue numérique et expérimental, aspects qu'il convient de maîtriser afin de ne pas perdre la qualité de modélisation lors de l'identification paramétrique ou encore lors de l'implantation numérique.

LOUCHE Hervé, Université Savoie

Date soutenance : 16 octobre 2009

Titre : Etude de certains phénomènes de localisation à partir de champs thermomécaniques

Résumé : Les thèmes de Recherche sur lesquels je travaille depuis ma thèse (soutenue en 1999) s'articulent principalement autour des deux axes : (1) analyses de champs thermiques et estimations de sources de chaleur accompagnant la déformation des matériaux et (2) études de certains phénomènes de localisation (de la déformation). L'objectif de ces travaux est de (1) développer une méthode d'analyse expérimentale basée sur des champs thermomécaniques et (2) d'établir des connaissances fondamentales sur les principes scientifiques et sur les mécanismes des phénomènes concernés. La problématique de la localisation est un sujet de Recherche important, qui concerne, en amont, la caractérisation/modélisation du comportement mécanique des matériaux et, en aval, l'amélioration de la qualité des structures ou de certains procédés de mise en forme. Ce mémoire montre l'apport de l'analyse de champs thermiques et cinématiques à cette problématique. J'expose dans un premier temps les caractéristiques des mesures de champs thermiques, puis la stratégie mise en oeuvre pour estimer les sources de chaleur. Ces dernières sont obtenues avec une méthode basée sur le calcul de dérivées de substituts filtrés (par FFT) des mesures de température. Elle s'appuie par

ailleurs sur une hypothèse de températures et de sources de chaleur homogènes dans l'épaisseur, hypothèse réaliste pour les cas de coques minces étudiés (plaques ou tubes). La technique d'estimation des sources de chaleur offre alors la possibilité d'obtenir une mesure de DSC durant un essai mécanique, ce qui constitue un outil original pour étudier en profondeur le comportement des matériaux et les couplages thermomécaniques. Ces outils et méthodologies sont ensuite appliqués à l'étude de six types de localisation : bandes de Lüders, striction, bandes PLC, endommagement localisé, localisation plastique dans des multicristaux d'aluminium, et changement de phase localisé dans des Alliages à Mémoire de Forme NiTi. On montre alors que les mesures de champs et leurs analyses permettent (i) de mieux caractériser, dans l'espace et dans le temps, les différentes localisations ; (ii) de discriminer, par l'intermédiaire des sources de chaleur, certains mécanismes de déformation et de (iii) fournir des résultats quantitatifs sur des couplages thermomécaniques : fraction de puissance plastique convertie en chaleur, puissance calorifique locale liée à un changement de phase sous contrainte.

LONGERE Patrice, Université Bretagne Sud

Date soutenance : 20 novembre 2009

Titre : Modélisation thermomécanique des matériaux et structures sous sollicitations sévères incluant les phénomènes de localisation dynamique

Résumé : Les travaux exposés s'inscrivent dans le cadre général de la plasticité dynamique des matériaux et des structures. Ils s'intéressent plus particulièrement à deux modes de détérioration ductile, le cisaillement adiabatique par bande et l'endommagement plastique ductile, tant du point de vue expérimental que du point de vue de la modélisation et de la simulation numérique. Le mémoire sur lequel s'appuie cet exposé s'articule autour de 4 parties. La première partie porte sur le développement de dispositifs d'essais rapides par barres d'HOPKINSON. Ce développement s'inscrit dans le cadre du renforcement des outils expérimentaux disponibles au Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux de Bretagne (LIMATB, EA4250) et plus particulièrement au sein de l'Equipe Génie Mécanique et Matériaux. Il a abouti à la conception et la mise au point des dispositifs de compression et de traction rapides utilisés notamment dans la caractérisation d'aciers et d'alliages de titane. La deuxième partie est consacrée au phénomène de localisation dynamique par bandes de cisaillement adiabatique vue comme la conséquence d'une instabilité thermomécanique. La température joue un rôle majeur dans ce mécanisme. Une méthode d'évaluation de l'échauffement plastique adiabatique est détaillée, basée sur une approche thermodynamique. A partir de l'application de la technique des perturbations linéaires au problème de la localisation dynamique, il est montré que les conditions d'amorçage du cisaillement adiabatique sont fortement influencées par la méthode retenue pour évaluer cet échauffement plastique. La troisième partie traite de la modélisation du comportement et de la détérioration des matériaux ainsi que du calcul de structures incluant de nombreux aspects numériques spécifiques au comportement dynamique. Dans le cadre d'une étude en collaboration avec NEXTER sur la vulnérabilité de structures de protection vis-à-vis du cisaillement adiabatique, l'approche utilisée pour la description post critique du comportement d'un matériau contenant des bandes de cisaillement est appliquée à la simulation numérique d'un problème 3D complexe de pénétration dynamique. Sont également rapportés des travaux plus récents sur l'endommagement ductile de matériaux structuraux sous chargement rapide, menés dans le cadre de thèses CIFRE, respectivement avec LIVBAG et DCNS. La dernière partie présente des pistes d'investigation complémentaire pour une meilleure description du comportement dynamique des matériaux et des structures, incluant les effets de l'écrouissage, de la vitesse, de la température, et de l'endommagement (à prendre au sens large, i.e. n'invoquant pas nécessairement la création de surfaces internes de décohésion), dans une perspective de simulation numérique de la réponse de structures à des chargements sévères.

ARBAB CHIRANI Shabnam, ENIBrest

Date soutenance : 3 décembre 2009

Titre : Comportements thermomécaniques des alliages à mémoire de forme: de la microstructure

aux applications

Résumé : Parmi les matériaux adaptatifs, les alliages à mémoire de forme (AMF), dont la microstructure est affectée par la contrainte mécanique et/ou la température, ont des caractéristiques mécaniques intéressantes. Leurs comportements thermomécaniques sont fortement non linéaires et hystérétiques. Ils sont basés sur un changement de phase solide- solide du type martensitique. Cette transformation de phase provoque des changements de forme réversible qui peuvent être spectaculaires et qui sont à l'origine de plus en plus d'applications. Ce travail porte essentiellement sur l'étude et la modélisation du comportement thermomécanique des AMF. Autour de ces matériaux, différentes techniques de modélisation à différentes échelles ont été étudiées et développées. Dans cette démarche, la complémentarité entre les approches a été exploitée pour développer des outils de modélisation pertinents, adaptés aux objectifs fixés et aux types d'applications visées. Il y a le passage par une étude microstructurale pour enrichir les approches basées sur la transition d'échelle. Ensuite ces dernières ont été utilisées pour obtenir des informations très importantes dans le développement de modèles phénoménologiques macroscopiques. Des modèles macroscopiques très utiles dans le dimensionnement de structures ont été développés. Dans ce développement nous avons tenu compte du caractère cyclique des chargements très présents dans les applications à base des AMF. Dans cette démarche les applications n'ont pas été oubliées. D'une part, nous avons essayé de contribuer à l'amélioration des applications existantes (étude des instruments dentaires superélastiques). Dans cette partie, le comportement mécanique et la fatigue de ces instruments ont été étudiés. D'autre part nous avons essayé de résoudre des points de blocage qui freinent le développement d'applications nouvelles dans le monde industriel (étude des actionneurs). Dans cette partie, nous avons mis au point des techniques de commande adaptées à toutes les complexités du comportement des AMF.

FROUSTEY Catherine, ENSAM Bordeaux

Date soutenance : 4 décembre 2009

Titre : Approches expérimentales de la sensibilité mécanique d'alliages métalliques à des chargements consécutifs de fatigue et d'impact

Résumé : Ce projet scientifique porte sur la prise en compte de l'histoire des chargements sur le comportement des matériaux, l'objectif étant de proposer des méthodes de prévision du potentiel de vie résiduel après un pré-endommagement. Ce thème concerne les matériaux métalliques soumis à des chargements consécutifs de fatigue et d'impact. Les domaines explorés sont celui des grandes durées de vie en fatigue et celui des moyennes vitesses de déformations pour l'impact ; il s'agit là de domaines représentatifs de chargements rencontrés communément dans le secteur du transport. Le développement de cet axe de recherche s'est appuyé sur deux approches : la caractérisation macroscopique du comportement et la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu. Pour appréhender la réponse macroscopique des matériaux, une tâche essentielle a été la mise au point de moyens d'essais de traction et de traction interrompue à grande vitesse, associés à différentes techniques de mesures et d'observations. Ainsi, un certain nombre de conclusions ont pu être établies ; mais on montre que c'est avant tout le matériau qui détermine le comportement résiduel, l'ordre d'application des chargements n'est pas fondamental, le matériau gardera ou non la mémoire de l'histoire. Pour une prévision rigoureuse du comportement résiduel, la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu est indispensable. Dans cette optique, plusieurs voies ont été suivies :

- l'étude de l'influence de la microstructure et de la composition du matériau sur les propriétés mécaniques,
- l'analyse des prises de vue réalisées pendant l'impact, pour rendre compte temporellement et physiquement des processus de déformation,
- l'analyse fractographique des faciès de rupture. Par cette analyse, on cherche à faire le lien entre la cinétique des défauts à l'échelle mésoscopique et le comportement du matériau à l'échelle macroscopique.

HADDADI Halim, Université Paris 13

Date soutenance : 4 décembre 2009

Titre : Mécanique non linéaire : contributions à la modélisation & expérimentation numérique - mesure de champs & identification

Résumé : Dans ce mémoire sont présentées quelques contributions à la mécanique non- linéaire expérimentale et numérique. Les non-linéarités concernent trois aspects : (i) la loi de comportement qui est élastoplastique, (ii) la cinématique qui est formulée dans le cadre des grandes transformations, et (iii) l'endommagement surfacique. Les apports à la mécanique expérimentale sont la mise au point de protocoles d'identification du modèle d'écrouissage de Teodosiu-Hu avec des séquences d'essais mécaniques classiques, et également les premières tentatives d'identification d'un modèle élastoplastique classique en utilisant des mesures de champs cinématiques qui sont entrain de révolutionner les méthodes d'identification en commençant par les essais mécaniques eux-mêmes qui, à l'opposé de ce que nous avons connus jusqu'à présent, doivent être aussi hétérogènes que possible. Ainsi, une nouvelle éprouvette de traction hétérogène a été développée, utilisée pour identifier le modèle, et validée sur un autre essai hétérogène. A l'échelle microscopique, les champs mécaniques dans les polycristaux sont hétérogènes par nature, et la surabondance des données expérimentales en surface n'arrive pas à combler le manque d'informations sur la morphologie 3D des grains. Ceci va obliger les expérimentateurs à recourir à des moyens originaux comme l'EBSD 3D. Il est important de noter que les techniques de mesure de champs cinématiques et thermiques ne sont pas un phénomène de mode. Ce nouveau moyen expérimental est susceptible de contribuer à de grandes avancées dans la compréhension des mécanismes de déformation et par conséquent la modélisation mécanique aussi bien à l'échelle microscopique que macroscopique. Les apports à la mécanique numérique concernent trois volets. Le premier est la modélisation géométrique qui permet de générer des microstructures virtuelles afin de fournir aux simulations numériques des maillages de plus en plus réalistes de polycristaux ou de matériaux composites. Le second volet a été le développement d'un code éléments finis Evimp3D, dans le cadre des grandes transformations, dans lequel ont été implémentées des lois de comportement élastoviscoplastiques macroscopiques et cristallines, ainsi qu'un modèle de zone cohésive. Ce code a été couplé avec des routines d'optimisation sous matlab afin de réaliser des identifications basées sur des mesures de champs cinématiques. Le dernier volet concerne le développement d'un modèle élastoplastique avec distorsion de surface de charge et son implémentation dans un code commercial via une routine utilisateur à la demande de l'industriel qui souhaite garder la même base de données de simulations numériques et réaliser des études comparatives entre différents modèles mécaniques. Les perspectives à court terme sont la participation à deux projets de recherche qui viennent de démarrer. Le projet ANR Mimic où on souhaite mieux comprendre les mécanismes intervenant dans la nanoplasticité et l'endommagement dans des matériaux à taille de grains bimodale. Et le projet Optimist dont l'objectif principal est le développement pour le titane d'un modèle élastoplastique macroscopique implémentable dans des codes EF de mise en forme.

ABED-MERAIM Farid, ENSAM Metz

Date soutenance : 7 décembre 2009

Titre : Contributions à la prédiction d'instabilités de type structure et matériau : modélisation de critères et formulation d'éléments finis adaptés à la simulation des structures minces

Résumé : Les travaux de recherche présentés dans cette HDR sont répartis en trois thématiques complémentaires. La première concerne la modélisation des instabilités locales dans les matériaux métalliques (localisation, striction ...). Il s'agit de développer des outils théoriques et numériques de prédiction de ces phénomènes et leur validation au travers de courbes limites de formage pour des aciers ferritiques ou dual-phase. Deux approches complémentaires ont été adoptées : la première est micromécanique se basant sur la plasticité cristalline couplée à des techniques de transition d'échelles, tandis que la seconde est phénoménologique utilisant des modèles de comportement avancés que nous avons couplé à de l'endommagement. Le critère de bifurcation de Rice, qui est relié à la perte d'ellipticité des équations gouvernant le problème aux limites, a été particulièrement

analysé au travers de ces deux approches. L'influence sur l'apparition d'une localisation de plusieurs paramètres matériau ou liés à la microstructure ainsi que l'effet de certains mécanismes déstabilisants ont été analysés. Il est mis en évidence, notamment, le rôle tout à fait essentiel de la formation de points de vertex aux points courants de la surface de plasticité dans la détection d'une localisation de la déformation plastique en bande de cisaillement. Le deuxième axe de recherche est relatif aux instabilités de type structure (flambage, plissement ...). Ces phénomènes se manifestent le plus souvent en présence de structures minces ou relativement élancées. Dans ce cadre, nous proposons une approche basée sur l'étude de stabilité des évolutions quasi statiques. Pour des matériaux sensibles à la vitesse de déformation, l'absence de bifurcation ainsi que d'états d'équilibre nous amènent naturellement à poser le problème comme celui de la stabilité de trajectoires quasi statiques. Pour les matériaux élasto-plastiques, cette approche est justifiée par le fait que bien souvent nous sommes en présence d'une évolution quasi statique, pour un trajet de chargement donné, même si chaque point de cette évolution représente un état d'équilibre. Le critère de stabilité unifié que nous proposons est donné par la positivité de la seconde variation de l'énergie totale et est valable pour des solides visco-élastiques, visco-plastiques ou élasto-plastiques. Plus récemment, nous avons étendu ce critère à des modèles à gradients. Enfin, la comparaison de ce critère avec les résultats existants relatifs au flambage plastique nous a permis de rediscuter le critère de non-bifurcation de Hill en relation avec le choix du modèle de plasticité approprié. Il est mis en évidence, de nouveau, le rôle important joué par le développement de points de vertex sur la surface de plasticité lors de la prédiction du flambage avec la théorie du module tangent élasto-plastique. Le troisième axe de recherche concerne le développement d'éléments finis de type coques volumiques. L'idée de ce nouveau concept est de combiner les avantages des éléments coques et 3D pour formuler des éléments particulièrement adaptés à la simulation des structures minces. Ces nouveaux éléments de coques volumiques ont l'avantage de prendre en compte la flexion suivant une direction choisie tout en conservant la formulation classique des éléments volumiques. Ils permettent ainsi de modéliser des structures comportant des parties minces et des zones épaisses, sans les difficultés habituelles de raccord de maillages contenant des éléments coques et 3D. Leur utilisation en emboutissage est très prometteuse, en particulier pour des problèmes où les effets dans l'épaisseur sont d'importance majeure. Étant sous-intégrés, pour améliorer leurs performances, les modes de hourglass générés sont alors efficacement stabilisés par des techniques récentes. Les modes de verrouillages (membrane et cisaillement transverse) sont éliminés par des techniques de projection pouvant se mettre sous le formalisme « Assumed Strain Method ».