

Dossier d'évaluation
d'une unité de recherche
Vague E : campagne d'évaluation 2013-2014

Nom de l'unité : LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLIDES
Acronyme : LMS
Nom du directeur pour le contrat en cours : Patrick LE TALLEC
Nom du directeur pour le contrat à venir : Patrick LE TALLEC

Type de demande :

Renouvellement à l'identique

Restructuration

Création ex nihilo

Choix de l'évaluation interdisciplinaire de l'unité de recherche :

Oui

Non

Dossier d'évaluation

1. Présentation de l'unité

1.1. Présentation et politique scientifique du contrat en cours

Le LMS est une UMR (Unité Mixte de Recherche) sous tutelle de l'École Polytechnique, du CNRS et de l'École des Mines. Créé en août 1961 à l'initiative du Professeur Jean Mandel, il rassemble actuellement un peu plus de 80 personnes.

Le domaine de recherche du LMS est la Mécanique des Milieux Continus, étudiée à des échelles multiples, avec un triple point de vue théorique, expérimental et numérique. Le laboratoire est un acteur de la recherche sur des sujets sociétaux comme l'efficacité et la durabilité des structures de transport, le stockage des déchets radioactifs, sur les matériaux actifs et énergétiques nécessitant des couplages multiphysiques ou encore sur les biomatériaux. Tout en développant son approche traditionnelle de modélisation théorique qui a fait sa réputation d'excellence, le laboratoire allie désormais des approches multiéchelles et pluridisciplinaires faisant appel par exemple à la physique pour les matériaux du photovoltaïque et pour l'étude du comportement des matériaux en relation avec leurs

évolutions microstructurales, ou encore à la biologie pour l'étude de la motilité cellulaire et des matériaux biologiques. Cette évolution a conduit le LMS à développer de façon très importante ses moyens expérimentaux non seulement par l'acquisition de machines d'essais ou d'observation mais surtout par la conception et la réalisation de nouveaux dispositifs expérimentaux originaux. L'activité du LMS en modélisation et simulation numérique est reconnue et s'inscrit dans la durée, comme le confirme l'existence de collaborations à long terme avec l'industrie.

En termes de formation, le laboratoire qui est l'une des trois composantes du Département de Mécanique de l'École polytechnique, contribue et participe activement aux enseignements de l'École Polytechnique, en particulier dans les programmes d'approfondissement de Mécanique, Innovation Technologique, et Énergies. Il est également un centre de formation doctorale en mécanique des solides connu à l'échelle internationale, se trouvant au cœur du triangle enseignement-recherche-entreprise. Le laboratoire forme environ une dizaine de doctorants par an.

Le laboratoire est enfin présent sur trois domaines d'application principaux (énergie, transport et mécanique des systèmes vivants) grâce à des collaborations à long terme avec des grands industriels nationaux (Total, EDF, PSA, SNCF, Michelin, SNECMA, Lafarge, Arkema, Herakles), avec des organismes de recherche tournés vers les secteurs de l'énergie (IFPEN, ANDRA, CEA), et par sa participation à l'action *Mécanique et systèmes vivants* du département de Mécanique de l'École Polytechnique.

Le laboratoire se structure autour de trois pôles de compétence.

Le Pôle « Comportement des matériaux et analyses multi-échelles » s'intéresse à la formulation de lois de comportement ou de critères d'endommagement des matériaux, à l'optimisation de leur microstructure, tout comme à l'évaluation de l'impact des procédés d'élaboration sur leur tenue mécanique. Cette activité s'appuie sur la caractérisation des microstructures et de leur hétérogénéité, l'étude expérimentale et la modélisation, aux échelles pertinentes (souvent multiples) de leurs mécanismes de déformation, d'endommagement et de rupture ainsi que la mise en œuvre de techniques de changement d'échelle.

Le Pôle « Comportement et durabilité des structures » s'intéresse à la modélisation de structures complexes et à l'étude de leur comportement. Cette activité est motivée par des applications industrielles (notamment via des collaborations dans les domaines du transport et de l'énergie). Dans ce cadre, des sujets tels que la fatigue et l'usure, l'analyse dynamique et la stabilité des structures, l'identification de comportements et l'inversion de données, l'étude des stockages souterrains connaissent de forts développements.

Le Pôle « Problèmes multidisciplinaires » s'intéresse aux nouveaux enjeux de la Mécanique des Solides : nouvelles stratégies de modélisation, étude de milieux complexes qu'ils soient granulaires, amorphes, actifs ou fonctionnels avec couplages thermomécaniques, mécanique-électromagnétiques, mécanique-chimiques, biologiques, et leurs multiples applications aux actionneurs, cellules photovoltaïques, biomécanique des cellules et des tissus, pour citer juste quelques exemples.

Ces activités ne sont possibles que grâce au support scientifique et technique et à l'activité de développement et de recherche de trois plateformes, la plateforme *Moyens d'essais statiques et dynamiques*, la plateforme *Microscopie, Mesure de Champs et Analyses* et la plateforme *Modélisation et Calcul*.

Une plateforme est un groupement de compétences et de moyens pour l'usage et le développement de moyens d'essais et de calcul. Les plateformes participent également à la formation d'étudiants de l'École Polytechnique, de masters ou d'Écoles d'ingénieurs partenaires dans le cadre de leurs enseignements expérimentaux.

Le laboratoire n'est pas opérateur principal de moyens lourds tels que FIB, tomographes ou autres, mais y a des accès systématiques par le biais de collaborations régionales ou nationales. Par contre, il garde un savoir-faire et la capacité :

- de développer des expériences originales assez fondamentales,
- de coupler étroitement analyse et observation microscopique et essais sous chargement,
- de développer son savoir-faire sur les mesures de champs (en liaison avec le Centre de Matériaux de l'École des Mines ParisTech et de l'Institut Navier) et sur les essais à chargement complexe contrôlé, à faible charge ou à grande sensibilité, que ce soit en multiaxial, en fluage ou autre.
- de mettre en œuvre des mesures in-situ spécialisées ou à grande sensibilité.

1.1.1. Plateforme STADY, moyens d'essais STATiques et DYNAMiques

Philippe Chevallier, Vincent de Greef, Erik Guimbretière, Pierre Valli, Responsable : Vincent de Greef - Chercheur Référent : Dirk Mohr

La plateforme STADY regroupe l'ensemble des moyens d'essais mécaniques du LMS, ainsi que les ingénieurs et techniciens chargés de les développer et de les maintenir. L'éventail des sollicitations est très large : efforts de 1N à 1500kN, vitesse de déformation de 10^{-12} à $1000s^{-1}$, sollicitations uni ou multi-axiales et sous tous modes (traction, compression, flexion, torsion, cisaillement...). Les deux principaux défis actuels sont :

- 1 - la mise au point d'essais complexes, avec plusieurs axes simultanés, interaction temps réel avec l'analyse des déformations par imagerie, ou environnement multi-physique.
- 2 - la réalisation de systèmes de chargement dédiés à des moyens d'observations spécifiques (MEB, tomographe, microscopie confocale).

Les principaux équipements à ce jour consistent en :

- Cinq presses hydrauliques uniaxiales (jusqu'à 1500kN) et une tri-axiale traction-compression/torsion/pression interne (100kN/600Nm/150MPa)
- Deux presses électromécaniques (100kN) et douze bâtis de fluage avec cellule de confinement.
- Bancs d'essais dynamiques « barres de Hopkinson », de diamètres (jusqu'à 80mm) et d'impédances variées, avec canon à air ou vérin hydraulique rapide.
- Deux fours et une enceinte thermique (-100 à 1600°C)
- Un Electro-aimant pour champ élevé (3T).
- Atelier de fabrication mécanique (commun aux deux plateformes) avec machines numériques et conventionnelles, et un atelier d'usinage des roches. Cet atelier permet de développer des prototypes d'essais originaux et adaptés.



Barres de Hopkinson

1.1.2. Plateforme Microscopie Mesures de Champs et Analyses (MiMeCA)

Jean-Christophe Eytard, Hakim Gharbi, Alexandre Tanguy. Responsable : Éva Héripé - Chercheur Référent : Véronique Doquet

La plateforme MiMeCA regroupe des compétences et des moyens matériels autour de l'observation et de l'analyse des matériaux aussi bien métalliques ou géologiques que biologiques et de leur déformation à l'échelle fine (du millimètre au micromètre). Pour cela, elle met en œuvre des outils de préparation d'échantillons (polissage, découpe, attaque chimique, ...) et des moyens d'observation : un microscope optique, un microscope optique numérique ainsi que deux microscopes électroniques à balayage équipés d'un détecteur EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) pour l'analyse chimique des matériaux ainsi qu'un outil d'analyse cristallographique par EBSD. L'un deux

est un MEB environnemental permettant l'observation d'échantillons sans métallisation ainsi que d'échantillons non secs.

La plateforme est également équipée de dispositifs d'essais mécaniques pouvant être utilisés dans le MEB ou sous Microscopie optique : une presse de 5kN pour la compression, la traction ou la flexion, une presse permettant la compression en mode environnemental (avec contrôle du taux d'humidité de l'échantillon), ainsi qu'une machine de traction/compression/torsion d'une capacité de 10kN et 50Nm.

L'analyse de la réponse mécanique à l'échelle de la microstructure est réalisée grâce à l'utilisation conjointe de lithographie électronique pour créer un marquage et de la corrélation d'images numériques permettant ainsi d'obtenir des champs de déformations à l'échelle de quelques micromètres.

Les développements de ces dernières années ont permis de réaliser des essais mécaniques de plus en plus instrumentés (Emission Acoustique pendant les essais sous MEB, contrôle de la température, contrôle de l'humidité, analyse des évolutions cristallines sous charge, ...) et précis. Cela a notamment permis d'élargir les études menées pendant de nombreuses années sur les seuls échantillons métalliques, aux matériaux géologiques et biologiques, très sensibles à la variation d'humidité et à la température, mais aussi demandant des gammes de sollicitation ou de déformation différentes.

1.1.3. Plateforme Modélisation et Calcul

Jean-Christophe Eytard, Responsable : Edouard Guigné - Chercheur Référent : Kostas Danas

Le LMS met en place et développe depuis 2012 un cluster de calcul (sur réseau-ultra-rapide) pour développer le dialogue expérience-calcul en mécanique. Il est partenaire pour ce faire de l'Equipex Matmeca du plateau de Saclay. Au niveau matériel, le cluster a 432 cœurs de calculs et devrait passer à 700 cœurs en 2014. Les serveurs de calcul sont reliés entre eux via un réseau Infiniband pour optimiser le calcul parallèle (au travers de commutateurs Infiniband) et via un réseau Ethernet classique (au travers de commutateurs Ethernet) ; un serveur maître pour la gestion des nœuds de calcul et la soumission des travaux et un SAN de 36 To (serveur de stockage) complète la configuration. Le cluster est relié à celui de ces partenaires en 10Gb/s via le réseau Rubis. Les caractéristiques des serveurs de calcul sont :

- chaque serveur est équipé de quatre nœuds biprocesseur, de fréquence 2,5 GHz avec une architecture 64 bits, équipés chacun de six cœurs ;
- chaque serveur doit être équipé de 64 Go de mémoire centrale et d'un disque dur SATA de 1 To.

Les caractéristiques du serveur maître sont :

- un biprocesseur avec six cœurs, de fréquence 2,5 GHz, avec une architecture 64 bits, compatible avec le jeu d'instructions X86, et support de la technologie « Hyper-Threading » ;
- une interface Infiniband ;
- deux interfaces Ethernet de débit 1 Gbit/s ;
- une interface Ethernet de débit 10 Gbit/s ;
- 64 Go de mémoire centrale ;
- 300 Go de stockage en RAID 5;
- interface Fibre Channel 8 Gb/s pour raccordement du serveur de stockage.

Les logiciels de calculs usuels du LMS sont installés sur le cluster. Certains de ces logiciels comme Abaqus ou Zebulon sont exploitables sur l'ensemble des nœuds de calcul car compatibles calculs distribués. D'autres logiciels de calculs tels que Castem, Matlab et les compilateurs Intel C / Fortran sont utilisables sur le cluster mais de manière plus restreinte sur chacun des nœuds (car incompatibles calculs distribués). Une étude a été lancée avec le CEA pour développer la parallélisation de CASTEM.

Le cluster permet aux membres du LMS (chercheurs, thésards et stagiaires) de développer leurs calculs par éléments finis dans un temps fortement réduit de par l'utilisation de plusieurs processeurs simultanément.

1.2. Profil d'activités

Unité/Équipe	Recherche académique	Interactions avec l'environnement	Appui à la recherche	Formation par la recherche
Ensemble	30 %	28 %	16 %	26 %

1.3. Organisation et vie de l'unité

Le Laboratoire de Mécanique des Solides travaille en très étroite collaboration avec ses trois tutelles, et tout particulièrement avec la Direction de la Recherche de l'École Polytechnique, avec la Délégation Régionale Ile de France Ouest et Nord pour la gestion du laboratoire, et avec l'INSIS (Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes) pour ce qui concerne au CNRS les demandes de moyens, la revue des objectifs et la stratégie du laboratoire.

Les correspondants de chaque tutelle pour les différentes activités (ressources humaines, gestion financière, valorisation, juridique...) sont bien identifiés et le LMS s'assure d'un lien constant avec ses différents interlocuteurs pour permettre un traitement rapide et efficace des différents dossiers.

L'équipe de direction s'assure toujours de la participation active des membres du LMS aux différents événements ou réunions organisées par les tutelles, et les membres du laboratoire sont largement impliqués dans les conseils scientifiques, groupe de travail ou de réflexion et projets animés par l'École Polytechnique, le CNRS ou par la Fédération de Coopération Scientifique (future Université) de Paris Saclay.

Organisation du laboratoire (organigramme fonctionnel annexe 4)

Comme décrit plus haut, le laboratoire se structure autour de 3 *pôles d'activités* travaillant en projets collectifs et de 3 *plateformes techniques* qui rassemblent l'ensemble des moyens techniques du LMS (Cf. : *annexe 3 : liste des équipements lourds*).

Ces activités scientifiques sont soutenues par *l'équipe administrative* assurant la gestion des moyens humains, financiers et techniques du laboratoire.

L'effectif global représente plus de 80 personnes évoluant chaque année au sein du laboratoire, incluant les permanents, les doctorants, post-doctorants, visiteurs et stagiaires.

L'effectif des permanents (32 personnes) a subi une légère diminution entre 2008 et 2013 mais il est à noter que près d'un tiers du personnel a été renouvelé durant cette période, en raison de nombreux départs à la retraite et de quelques mutations. Le nombre de chercheurs est passé de 16 à 11 en 2013 tandis que le nombre d'enseignant-chercheurs a augmenté en passant de 4 à 6 en 2013. Quatre recrutements ont été effectués durant cette période (2 enseignant-chercheurs et 2 chercheurs CNRS). Le recrutement de chercheurs ou enseignants chercheurs est un des enjeux du laboratoire. L'effectif d'ingénieurs-techniciens, actuellement de 15, a été en grande partie renouvelé puisque 8 recrutements ont été effectués avec 2 ingénieurs de recherche dont le responsable de la plateforme modélisation et calculs, 2 ingénieurs d'études, 1 Assistant Ingénieur et 3 techniciens.

Trois chercheurs émérites sont actuellement accueillis au laboratoire.

L'effectif des non-permanents a évolué en suivant la politique de développement de la formation par la recherche au sein du LMS. Le laboratoire accueille chaque année plus d'une trentaine de doctorants (10% de plus qu'en début de période), une dizaine de post-doctorants et une quinzaine de stagiaires chaque année.

Le laboratoire a développé sa politique d'échanges scientifiques et accueille régulièrement des chercheurs ou professeurs invités, avec en moyenne un professeur senior invité par an. À noter aussi le développement de la représentativité internationale : 5 nationalités différentes parmi les chercheurs et plus d'un tiers des doctorants de nationalité étrangère.

Crédits

Les sources de crédits du LMS représentent un montant moyen annuel proche de 1.5 M€ - reports inclus. Ces chiffres sont hors masse salariale des permanents estimée à 2.2 M€ et n'incluent pas non plus les bourses de doctorants CIFRE ou ministère estimées à 0,7M€. Les crédits sont issus pour 85 % des ressources propres du laboratoire soit des contrats ANR (25% - 10 contrats en moyenne) soit des contrats avec nos partenaires industriels (60 % - plus de 30 contrats actifs chaque année), le reste provenant des subventions annuelles de nos tutelles.

Les crédits issus des dotations annuelles ou des contrats non justifiables sont mutualisés et permettent le fonctionnement général du laboratoire, le développement d'activités expérimentales, le développement des plateformes techniques ainsi que la participation des chercheurs à des colloques et événements scientifiques et l'accompagnement des doctorants. Les crédits issus des contrats à justifier - type ANR - sont dédiés au projet concerné.

Le suivi budgétaire est consolidé en termes de recettes (par tutelle, par source) et de dépenses (par projet, par nature). Chaque année, un budget prévisionnel est établi (et est suivi) pour chaque projet scientifique et plateforme et un arbitrage permet de s'assurer que les financements prévus sont effectivement en ligne avec la stratégie du laboratoire et ses priorités (présentation et décision en comité de direction avec discussion en conseil de laboratoire).

Le budget est présenté en conseil de laboratoire, un état trimestriel est adressé à chaque responsable de projet et des points réguliers sont effectués en comité de direction.

Gouvernance

La gouvernance du laboratoire a été revue en 2010 lors de la mise en place de la nouvelle direction. Un comité de direction a été installé, composé de 6 membres avec le Directeur, 2 enseignants-chercheurs, 3 chercheurs et l'adjointe au Directeur-administrateur du laboratoire. Ce comité de direction se réunit tous les 15 jours pour traiter les questions, projets en cours et décider des actions à prendre pour le pilotage et la gestion du laboratoire.

Le conseil de laboratoire, en place depuis le début du mandat actuel, a été renouvelé en Février 2013 et se réunit plus de 3 fois par an. Les compte-rendus sont publiés et affichés au sein du LMS. La composition du conseil a été légèrement modifiée en 2013 pour permettre une meilleure représentation de chaque catégorie de personnel (chercheurs, ingénieurs de recherche, techniciens et administratifs, doctorants).

Une assemblée générale a lieu 1 fois par an.

Le poste d'adjointe au Directeur en charge de l'administration du laboratoire, l'exécution budgétaire et la politique contractuelle a été créé en 2010. La restructuration de l'administration du LMS a ainsi permis la gestion consolidée des moyens financiers, l'optimisation du suivi des contrats de recherche et une personne est maintenant dédiée à la gestion des ressources humaines.

Vie scientifique

La vie scientifique du laboratoire a été développée sur trois aspects :

- les « séminaires du jeudi », permettant chaque semaine à un invité de faire un exposé scientifique sur des sujets très variés. Ces séminaires hebdomadaires sont ouverts à tous les membres du LMS, partenaires, École Polytechnique. Un budget spécifique a été alloué afin de permettre d'y inviter des collègues internationaux de renom (avec en moyenne un tel invité par mois). Le programme est diffusé sur le site internet du laboratoire et chaque exposé fait l'objet d'affiches et de publicité.
- le symposium « Jean Mandel », événement scientifique sur une thématique particulière chaque année (1er symposium en 2012), se déroulant sur une journée avec un invité de renommée internationale sur la thématique et la présentation des travaux des doctorants du laboratoire en lien avec cette thématique.
- la journée des doctorants, permettant aux doctorants en 2ème année de thèse de présenter leurs travaux devant les chercheurs du laboratoire et quelques invités. Cette journée a été mise en place en 2012, et complète la formation doctorale. Par ailleurs, il est demandé à tous les doctorants de maintenir à jour un poster de présentation de leurs travaux en anglais.

Communication

La communication externe et interne est un point qui demande à évoluer. Mais des actions ont été menées : site internet, publicité d'évènements scientifiques organisés par le laboratoire.

Le site internet du laboratoire a notamment été actualisé et restructuré et des évènements scientifiques sont régulièrement organisés par le laboratoire :

- une journée d'accueil des nouveaux arrivants est organisée chaque année.
- Le LMS participe activement à des évènements tels que la semaine de la science organisée à l'École Polytechnique, la Nuit des Chercheurs et l'accueil de lycéens dans le cadre du programme apprentis-chercheurs.
-

À noter que le LMS a fêté ses 50 ans en décembre 2011, occasion d'organiser un évènement scientifique rassemblant les membres actuels, anciens et partenaires du laboratoire.

Règles de vie, sécurité

Le règlement intérieur régie les règles de vie et les règles de sécurité du laboratoire. Il est publié et affiché au sein de l'unité. Il vient d'être actualisé en début d'année 2013.

Le correspondant sécurité du LMS s'assure du respect des bonnes règles de sécurité et des formations à suivre par l'ensemble du personnel (permanents et non permanents) et le document unique est mis à jour chaque année (annexe 8). Il y inclut une annexe sécurité listant les règles de base à respecter et remise à chaque nouvel arrivant au laboratoire.

Cf. Annexe 5 : règlement intérieur et annexe sécurité & Annexe 8 : document unique.

1.4. Faits marquants

Colloques

- ◆ **Symposium international** en l'honneur de Dang Van Ky (2008), H.D. Bui (2009) et de Q.S. Nguyen (2010)
- ◆ **Organisation du Colloque** annuel du Groupe Français de Rhéologie (2008).
- ◆ **Coorganisation**, de la Fourth European Conference on Computational Mechanics (ECCM 2010).
- ◆ **Organisation du workshop Euromech** on Multiscale effects in fatigue metals (2010).
- ◆ **50 ans du LMS** : (2011, 140 participants internationaux)
- ◆ **Symposia Jean Mandel** : « Endommagement et rupture » (2012, avec K. Ravi-Chandar), « Couplages multiphysiques » (2013, avec R. D. James et en collaboration avec le PICM)
- ◆ **Coorganisation** de la 7ème Conference on the Mechanical Behavior of Salt, (avril 2012).

Prix et distinctions

- ◆ **Bui Hui Duong** nommé en 2008 chevalier de la Légion d'Honneur au titre du ministère de la recherche avec publication d'un numéro spécial de Comptes Rendus de l'Académie des Sciences en son honneur.
- ◆ **Habibou Maitournam** est lauréat du prix Plumey 2009 de l'Académie des Sciences en reconnaissance de ses travaux sur le comportement à la fatigue des structures. En 2011-2012, il a été Clark B. Milikan visiting Professor à Caltech.
- ◆ **Jean Jacques Marigo** a obtenu le Tullio Levi Civita International Prize in Mechanics and Applied Mathematics
- ◆ **Jean Salençon** a été nommé Commandeur de la Légion d'honneur (2010), Commandeur des Palmes académiques (2013) et élu membre correspondant étranger de l'Academia das Ciências de Lisboa et

membre correspondant de l'Académie de Montpellier. Il a présidé l'Académie des Sciences en 2009-2010.

- ◆ **Nick Triantafyllidis** a obtenu la Médaille Warner T. Koiter 2010 de l'American Society of Mechanical Engineers et le Prix Paul Doistau-Émile Blutet 2010 de l'Académie des Sciences
- ◆ **Lev Truskinovsky** est pour 2010 William and Flora Hewlett Foundation Fellow at the Radcliffe Institute for Advanced Study and Wyss Institute Visiting Fellow à Harvard University
- ◆ **Diansen Yang**, post-doctorant du LMS a été recruté à l'Académie des Sciences de Chine en tant que lauréat du concours «Thousand Young Talents program».
- ◆ **Marc Rébillat**, (thèse au LMS), prix Yves Rocard (ex Jeune chercheur) 2012 de la Société française d'acoustique.

Articles et thèses primées

- ◆ L'article de **D. Mohr et S. Henn**, « Calibration of stress-triaxiality dependent crack formation criteria : a new hybrid experimental-numerical method », prix Hetenyi 2009 du meilleur article de la Society for Experimental Mechanics.
- ◆ Best Paper award from ASME Turbo Expo 2009 pour la communication A modeling approach to predict fretting fatigue on highly loaded blade roots par **P. Wackers, V. Arrieta, M. Alquezar, A. Constantinescu, H. Maitournam**, en collaboration avec MTU Aeroengine (Munich, Allemagne).
- ◆ *Young Investigator Prize* en "Multibody & Non-Smooth Dynamics" accordé à **Anders Thorin** lors de la conférence CanCNSM2013.
- ◆ Deux prix de thèse de l'Ecole Polytechnique (2009 et 2012)

Grandes initiatives

- ◆ **Plan Campus** : (Equipex MATMECA, Labex LAPSIS, ANR)
- ◆ **Accueil de Nick Triantafyllidis en 2009** : Suite à une action coordonnée entre le CNRS et l'Ecole Polytechnique, le LMS a accueilli Nick Triantafyllidis de l'Université du Michigan comme Directeur de Recherche et Professeur au Département de Mécanique. Deux postes d'accompagnement ont également été créés sur lesquels le CNRS a recruté Konstantinos Danas (CR) et l'Ecole polytechnique, Laurence Bodelot (MDC). Trois post-doctorants ont également été recrutés au LMS entre 2009 et 2012 par la même opération : M. P. Santisi, G. Pampolini, et T. Putelat.
- ◆ **Chaire André Citroën** : Les objectifs de cette chaire, mise en place en 2011, sont de développer les thématiques scientifiques liées à la modélisation des matériaux et structures mécaniques, à la physique des surfaces, à la modélisation numérique et aux couplages multi-physiques.
- ◆ **OpenLab Computational Mechanics**: Mis en place en 2011 avec PSA et le Centre des Matériaux de l'Ecole des Mines, il a pour but de développer les compétences et la recherche dans le domaine de la mécanique des solides, des structures et des matériaux.
- ◆ **Partenariat Caltech** : signé le 5 Mars 2013, ce programme permet aux étudiants sélectionnés à suivre un programme de formation doctorale conjoint dans l'Aéronautique, l'ingénierie spatiale ainsi que la mécanique.
- ◆ **Mise en place** d'une collaboration avec le Ladhyx et installation dans 400m² de locaux dédiés d'un groupe de recherche sur la mécanique et systèmes vivants. Il comprend à ce jour 7 permanents et 10 doctorants et post-doctorants. Son projet scientifique est centré sur la mécanoperception en modélisation et génie cellulaire, en haptique et en biomécanique végétale.

Résultats ou activités scientifiques

- ◆ Une nouvelle modélisation du cycle de contraction musculaire a été développée. Le modèle est une des premières descriptions purement mécaniques des quatre étapes du cycle de contraction de Lymn-Taylor prenant en compte la biochimie de base du cycle de contraction musculaire.
- ◆ Dans le cadre du projet ANR Microgodet, en collaboration avec le laboratoire 3S-R de l'INPG, on a mis en place, grâce au dispositif de tomographie de l'ESRF, une procédure d'analyse des déformations d'un milieu

granulaire donnant accès à la connaissance du mouvement de l'ensemble des grains constitutifs d'un échantillon.

- ◆ Le paradoxe de matériaux magnéto-rhéologiques selon lequel l'application d'un champ magnétique externe conduisait, selon les précontraintes, à des magnétostrictions de signe différents a été résolu avec mise en évidence du rôle essentiel de la micro-géométrie sur la magnétostriction macroscopique de ces matériaux.

2. Réalisations

Production scientifique de la période 01/01/2008 à 30/06/2013.

2.1. Production scientifique

2.1.1. Comportement des matériaux et analyse multi-échelle

L. Bodelot, E. Chabert, A. Constantinescu, K. Danas, V. Doquet, V. De Greef, A. Dimanov, E. Heripre, D. Mohr, J. Raphanael, N. Triantafyllidis (permanents); B. Barkia, C. Besse, M. Bourcier, C. Château, E. Chaumon, J. Dautria, M. Dunand, F. Ebnoether, J.B. Esnault, D. Geoffroy, M.B. Lê, d'A.B. Mbiakop-Ngassa, J. Papasidero, C. Roth, L. Zinmeister (doctorants) ; N. Abbadi, N. Ben Ai, Q.H. Bui, M. Dubé, C. Gouttebroze, D. Picard, G. Gu, D. Yang (post-doctorants).

La formulation de lois de comportement ou de critères d'endommagement rendant compte des réponses des matériaux à des sollicitations simples ou multiaxiales, quasi-statiques, cycliques, ou dynamiques, associés à une histoire thermique ou à la présence d'un environnement corrosif nécessitent la caractérisation des microstructures, l'étude et la modélisation, aux échelles pertinentes des mécanismes de déformation, d'endommagement et de rupture et la mise en œuvre de techniques de changement d'échelle. Le pôle « Comportement des matériaux et analyses multi-échelles » rassemble les compétences du LMS sur ces thématiques et contribue, en collaboration avec le pôle « Comportement et durabilité des structures », à une approche intégrant les caractéristiques et spécificités du matériau constitutif et celles de la structure, ainsi que de son environnement physico-chimique. Les thèmes abordés depuis 2008 vont du comportement des verres métalliques, à la poro-élasticité des roches, en passant par la fatigue et la rupture ductile des métaux, le fluage des argilites ou du titane, la plasticité du sel gemme ...

Rupture ductile à basse triaxialité

K. Danas, V. Doquet, D. Mohr, J. Papasidero, M. Dunand, G. Gu, C. Besse, F. Ebnoether, C. Roth

Les modèles classiques prévoient la chute de ductilité des métaux lorsque le taux de triaxialité augmente, mais pas la transition vers un mode de rupture sans croissance de cavités à faible taux de triaxialité, ni l'évolution non monotone de la ductilité qui l'accompagne. Les modèles avancés incorporent l'angle de Lode, dont l'effet est certes attendu, mais non démontré. Aussi, des travaux, couplant étroitement expérimentation, modélisation et simulation numérique ont-ils été entrepris au LMS pour combler cette lacune :

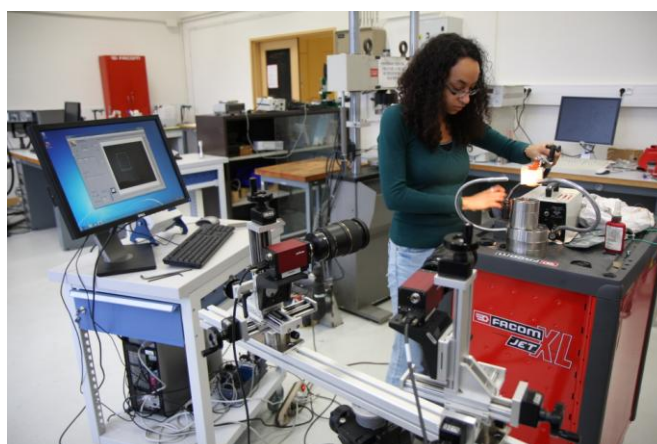
Pour les matériaux « massifs », mise au point d'essais à rupture sur des tubes entaillés en traction et torsion combinées en proportions variables, accompagnés de mesures 3D, par stéréo-corrélation d'images, des champs de déplacement servant de conditions aux limites aux simulations numériques, dans le cadre de la thèse de J. Papasidero (2010-2013, co encadrée par D. Mohr et V. Doquet). Les résultats obtenus sur un alliage d'aluminium comme sur un acier suggèrent, à l'encontre des résultats publiés par Bao et Wierzbicki, une ductilité plus élevée à triaxialité nulle que moyenne, dont un critère d'endommagement de type Mohr-Coulomb permet de rendre compte.

Pour les tôles minces, développement de procédures d'essai à rupture quasi-statiques ou dynamiques sous des états de contrainte variés, dans le cadre des thèses de M. Dunand (2010-2013, encadré par D. Mohr) et C. Roth (2012-2015, encadré par D. Mohr) en collaboration avec le Crashworthiness Lab du MIT

Analyse des processus d'endommagement au moyen d'observations MEB/micro-tomographie réalisées lors d'essais interrompus ou en temps réel, lors d'essais sous MEB, ou couplés à de la micro-tomographie sous rayonnement synchrotron (dans le cadre du projet ANR Loterie, en collaboration avec l'équipe du Centre des Matériaux: T. Morgeneyer, J. Besson, G. Rousselier, M. Maziere). Les processus d'endommagement menant à la rupture de tôles d'acier ont été analysés en détail par M. Dunand en collaboration avec K. Ravi-Chandar de

l'Université d'Austin, Texas, lors de son séjour d'un an au LMS. G. Gu (post-doc encadré par D. Mohr), poursuit ces travaux, en considérant les effets de l'anisotropie microstructurale et mécanique

Formulation de critères phénoménologiques ou de modèles micromécaniques des processus conduisant à la rupture. K. Danas, a développé, en collaboration avec P. Ponte Castaneda de l'Université de Pennsylvanie, et N. Aravas, de l'Université de Thessalie, des méthodes d'homogénéisation en viscoplasticité des milieux poreux permettant de décrire les évolutions de forme des cavités, qui rendent compte de l'influence du paramètre de Lode sur la ductilité. Ce modèle a été implémenté dans un code éléments finis et des contrats ont été conclus avec Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation pour sa mise en œuvre sur des aciers dual-phase. La thèse d'A.B. Mbiakop-Ngassa (encadrée par K. Danas et A. Constantinescu) et le projet ANR Indiana se situent dans le prolongement de ces travaux. Enfin, un modèle avancé de « cellule élémentaire représentative » poreuse a été développé par M. Dunand et D. Mohr et permet l'étude numérique des phénomènes de localisation en fonction de l'état de contrainte. Enfin, des modèles avancés de plasticité en grandes déformations (plasticité non associée, plasticité de transformation, prise en compte du maillage et de la texture...) ont été développés.



Mesure de stéréo-corrélation sur éprouvette métallique en chargement triaxial

Approches multi-échelles des matériaux et structures géologiques

A. Dimanov, J. Raphanel, M. Bourcier, D. Picard, C. Gouttebroze, D. Yang, L. Zinsmeister.

Une caractérisation multi-échelle du comportement mécanique de matériaux géologiques (minéraux et roches) a été menée. Une approche micromécanique (caractérisation des propriétés globales et des champs locaux par corrélation d'images 2D et 3D, modélisation EF) a été appliquée 1) à des roches silicatées de la base de croûte continentale (denses et très peu perméables : gabbros), 2) des roches réservoir (poreuses et perméables : grès, calcaires) 3) des roches de couverture (très peu perméables : sel gemme, argilites). Les applications concernent la géologie, l'environnement et l'énergie. Ainsi, la compréhension des interactions fluide-roche basées sur des processus hydriques/hydrauliques, chimiques et thermomécaniques couplés a été améliorée.

Dans le cas des roches réservoir, ont été caractérisées : 1) Les effets de l'état de contraintes sur l'écoulement (non réactif) tri-directionnel et les effets des hétérogénéités de microstructure sur la compaction/endommagement (Thèse LMS-IFP: J. Dautriat 2006-2009, prix de thèse de l'X), 2) l'impact d'altération par fluide agressif (acide retardé) sur la microstructure (réseau de porosité), la perméabilité et la tenue mécanique de la roche (Thèse LMS-IFP: L. Zinsmeister, 2010-en cours). Ces résultats sont directement utilisables pour la modélisation de la subsidence de site en exploitation d'hydrocarbures et de l'évolution du réservoir du fait de l'adoucissement/endommagement de la roche hôte loin du puits d'injection en conditions de stockage géologique de CO₂.

Dans le cas des roches argileuses, le fluage a été étudié en fonction de l'humidité relative et les endommagements locaux (échelle de la microstructure) liés aux gonflements/retraits associés. Les déformations liées à l'anisotropie structurale du matériau ont été mises en évidence et quantifiées (post-doc : D. Yang, 2008-2012 et thèse LMS : L. Wang, 2009-2012). Ces résultats contribuent à l'élaboration des lois de comportement en vue de la prédiction de l'évolution du site de Bure, dans le cadre du stockage à long terme des déchets nucléaires.

Dans le cas des roches salines, le fluage à court et à long terme a été caractérisé en identifiant les mécanismes microphysiques actifs : la plasticité cristalline et le glissement aux joints de grains. Ceci a démontré leur caractère coopératif : le glissement est nécessaire pour accommoder les incompatibilités plastiques entre grains voisins, mais entraîne progressivement l'endommagement. Ces données sont essentielles pour prévoir l'évolution des cavités salines dans le cadre du stockage d'hydrocarbures et d'énergie sous forme d'air comprimé (thèse LMS : M. Bourcier, 2009-2012; post-docs : D. Picard, 2011-2013 et C. Gouttebroze, 2012-2013). Enfin, se basant sur le sel comme matériau analogue, des modèles numériques du comportement viscoplastique du polycristal ont été élaborés, en tenant compte de l'interaction des différents mécanismes.

Dans le cas des silicates, le comportement viscoplastique et les interactions locales pour des matériaux polyphasés hétérogènes a été modélisé numériquement, en se fondant sur les lois viscoplastiques des constituants. Ces données permettent de modéliser le comportement des zones de cisaillement ductile sous-jacentes aux failles sismiques de surface.

Pour réaliser ces travaux, des moyens expérimentaux originaux triaxiaux ont été développés, permettant les mesures d'écoulement tridimensionnel sous chargement, ou couplés à la microtomographie RX, mais aussi des moyens d'investigation micromécanique par mesures de champs 2D et 3D, par suivi in-situ en microscopie optique, MEB ou MCT lors du chargement. Les travaux sont issus de collaborations nationales (IFPEN, Navier, ENS) et internationales (GFZ).

Fatigue, fluage et fissuration à échelle locale.

V. Doquet, E. Heripre, M. Dubé, Q. H. Bui, M. Abbadi et N. Ben Ali, B. Barkia, J.B. ESnault, M.B. Lè, A.B. Mbiakop-Ngassa, E. Chaumun, D. Geoffroy

Ce thème recouvre différents sujets et projets en fonction des matériaux étudiés.

Viscoplasticité, fatigue et fluage du titane et de ses alliages

La thèse de P. Lefranc (co-encadrée par V. Doquet et C. Sarrazin-Baudoux du LMPM Poitiers, soutenue en 2008) a permis de mieux comprendre les interactions fatigue/fluage à l'ambiante dans un alliage de titane, en relation avec sa teneur en hydrogène. On a montré que des temps de maintien sous forte contrainte accélèrent l'amorçage et la propagation des fissures. Le premier effet a été analysé par un modèle de dynamique des dislocations. Le second a été attribué à l'hydrogène se concentrant en pointe de fissure et y favorisant le fluage. C'est pour clarifier les interactions dynamiques entre dislocations et atomes d'hydrogène mais aussi d'oxygène en solution dans le titane et leurs conséquences sur le fluage à l'ambiante et la rupture différée que le projet ANR Blanc Fluti (2010-2014) a été monté, en partenariat avec l'ICMPE, le Centre des Matériaux de l'EMP et le LSI de l'EP. La thèse de B. Barkia (2011-2014, co-encadrée par V. Doquet et I. Guillot, ICMPE) a mis en évidence un vieillissement statique causé par l'oxygène, se traduisant notamment par un temps d'incubation avant fluage à basse contrainte et un vieillissement dynamique dont l'origine reste à préciser. Un modèle de viscoplasticité cristalline est en cours d'identification, sur la base d'essais de traction (classique ou sous MEB, avec EBSD permettant l'analyse des systèmes actifs) fluage, relaxation et sauts de vitesse. V. Doquet et V. de Greef ont étudié l'interaction fatigue-fluage à froid dans un alliage de titane en reproduisant, par superposition de traction et de pression interne sur des éprouvettes tubulaires, la tension biaxiale subie par les disques de moteurs d'avions en rotation. Paradoxalement, les sollicitations biaxiales s'avèrent bénéfiques en fatigue pure, ce qui a été attribué à un ralentissement de la propagation des fissures par la contrainte non singulière positive.

Au cours de sa thèse (co-encadrée par J. Crépin du CdM, A. Roos de l'Onera et E. Héripré) soutenue en 2013, D. Geoffroy a étudié lors d'essais sous MEB la fissuration intra ou intergranulaire d'alliages TiAl, qu'il a simulée en introduisant des zones cohésives dans un modèle d'agrégat polycristallin.

Fissuration par fatigue en mode d'ouverture, de cisaillement, ou en mode mixte

Dans le cadre du projet ANR Mixmodfatfis (2006-2009), en collaboration avec le LMT, V. Doquet, M. Abbadi (post-doc 2007-2008) et Q.H. Bui (post-doc 2008-2009) ont montré que des chargements cycliques de mode mixte non-proportionnel d'amplitudes ΔK_I , ΔK_{II} nominales identiques peuvent produire des trajets de fissuration bien différents. Des simulations numériques prenant en compte la rugosité des fissures et le frottement de leur lèvres ont permis de l'expliquer par les valeurs effectives fort différentes des ΔK_I , ΔK_{II} associées à ces chargements. En collaboration avec A. Constantinescu, on a montré qu'un chargement statique de mode II amplifie les effets de fermeture induits par les aspérités mais atténue ceux induits par la plasticité et que ΔK_I^{eff} , ΔK_{II}^{eff} ne rendent pas compte des interactions synergiques des deux modes, en termes de plasticité et d'endommagement devant la pointe de fissure, qu'une

approche basée sur des simulations élasto-plastiques et l'application locale de critères de fatigue permet au contraire d'appréhender. La fissuration en mode de cisaillement plan et antiplan combinés a été étudiée à l'aide d'un dispositif original et simulée numériquement en 3D, par une approche locale qui permet de prévoir les évolutions de la forme du front de fissure. Dans le cadre de sa thèse co-encadrée par V. Doquet et P. Massin (Lamsid), J.B. Esnault (2010-2013) a caractérisé en 3D le trajet et les cinétiques de propagation des fissures de fatigue dans des tôles minces d'acier ou d'aluminium et montré qu'un environnement corrosif inhibe ou retarde leur déversement en « lèvres de cisaillement ». Il a mis en œuvre la méthode X-Fem pour analyser la propagation en mode mixte de ces fissures gauches à fronts courbes. L'application devant le front de fissure d'un critère de fatigue de type « plan critique » a permis de rendre compte du déversement.

Fissuration d'un verre borosilicate pour la vitrification des déchets nucléaires.

L'étude commencée en 2007 par V. Doquet, E. Chabert et A. Constantinescu en partenariat avec le CEA, l'Andra et Areva a impliqué également M. Dubé (post-doc 2007-2009) puis N. Ben Ali (post-doc, 2011-2013). Elle s'est d'abord consacrée à la caractérisation et la modélisation, par une approche de type mécanique de l'endommagement, de la multi-fissuration sous choc thermique d'un verre utilisé pour la vitrification de déchets nucléaires. Une méthode énergétique a été développée avec succès pour prévoir l'accroissement de surface par multi-fissuration, lors de chocs thermiques induisant une tension biaxiale ou triaxiale. Grâce à la contribution de X. Boutillon, des mesures vibratoires ont permis une évaluation quantitative indirecte de l'endommagement et une validation des modèles. La fissuration sous-critique du verre en mode I ou en mode mixte a ensuite été caractérisée au moyen d'essais de compression sur des éprouvettes DCDC, dans des conditions représentatives de celles du stockage souterrain. Dans le but d'identifier un modèle d'endommagement continu pour la corrosion sous contrainte, des échantillons multi-fissurés par choc thermique ont été sollicités en flexion biaxiale dans un lixiviat à 90°C et des mesures périodiques de leurs fréquences propres ont permis un suivi de la perte de rigidité associée à la propagation des fissures. Enfin, la cicatrisation thermiquement induite des fissures a été mise en évidence au moyen d'essais de fissuration sous MEB, avant ou après des recuits provoquant la formation de « ponts » entre les lèvres de fissure.

De manière complémentaire, E. Héripé et E. Chabert contribuent, en collaboration avec l'ICMPE, au développement de verres métalliques résistants à l'impact et formables à chaud, dans le cadre du programme Astrid VMPB 2011-2014, au moyen d'essais sous MEB accompagnés de mesures de champs et prochainement, d'analyses du comportement viscoélastique à chaud, grâce à l'acquisition d'un appareil de DMA.

Comportement et endommagement de composites Sic-Sic

La thèse de C. Château menée en collaboration avec le CEA, le laboratoire Navier et le Centre des Matériaux et soutenue en 2011 a été consacrée au comportement élastique anisotrope et à l'endommagement de composites Sic-Sic. Des essais de traction sous MEB ont fourni la chronologie d'apparition, la répartition spatiale et l'évolution de l'ouverture des fissures. Ceux entrepris à l'ESRF ont permis une caractérisation en 3D de l'endommagement par microtomographie holographique à très haute résolution. L'étude de la réponse d'une microstructure virtuelle, par homogénéisation numérique a mis en évidence les effets de la porosité. Un modèle statistique d'endommagement a été identifié.

Développement et optimisation de matériaux sandwichs emboutissables

Le comportement de matériaux sandwich dont le cœur est constitué de deux tôles d'acier embouties et brasées entre elles a été étudié, sous la direction de D. Mohr, par C. Besse (thèse soutenue en Avril 2012) qui a formulé une loi de comportement rendant compte de l'écrouissage lié à la distorsion et par F. Ebnoether (thèse soutenue en Novembre 2012) qui a développé un modèle numérique allant de l'emboutissage des tôles au cisaillement global du sandwich, permettant de déterminer la géométrie optimale quant au rapport entre rigidité et densité.

2.1.2. Comportement et durabilité des structures

A. Constantinescu, V. Doquet, H. Maitournam, Q.S. Nguyen, C. Stolz, N. Triantafyllidis (permanents); A. Azoug, A. Benoit, S. Bosia, V. Courtier, C. Krebs, A. Launay, M.B. LÊ, D.H. Luu, E. Merhy, C. Roux, S. Tabibian (doctorants) ; L. Legrand (post-doctorante).

Une part importante des activités du pôle tourne autour de la thématique « fatigue et durée de vie des structures ». Elle comprend le développement de cadres thermodynamiques adaptés, la proposition de modèle de comportement, l'étude des états asymptotiques sous chargements cycliques et l'estimation de la durée de vie à l'amorçage, puis à la propagation de fissure. Tous les domaines de fatigue sont abordés (endurance limitée, fatigue oligocyclique, fatigue thermomécanique).

Une illustration de cette démarche est fournie par le travail effectué sur les structures en thermoplastiques renforcés en fibres de verre courtes, pour lesquelles de nouveaux modèles de comportement et de durée de vie ont été élaborés. Ceux-ci sont les fruits de la collaboration entre PSA (A. Launay, I. Raoult), le LBMS de Brest (Y. Marco) et le LMS (A. Launay, H. Maitournam). Un modèle de comportement anisotrope original [Launay *et al* : MM 2013, IJP 2011, PE 2011, PE 2010], à la fois viscoélastique à deux échelles de temps, viscoplastique à écrouissage cinématique non linéaire et à adoucissement cyclique, a été élaboré à partir d'une vaste campagne d'essais variés. Il a permis de décrire la réponse cyclique du matériau pour différentes conditions environnementales (température et taux d'humidité représentatifs des sollicitations sur pièce). Enfin, un modèle de durée de vie pour structures anisotropes, fondé sur une approche énergétique [Launay *et al* : IJF 2013a, IJF 2013] a été proposé et validé avec des résultats issus d'une campagne expérimentale réalisée sur des éprouvettes de traction présentant des microstructures variées.

Les mécanismes de déformation et d'endommagement du propergol ont été étudiés dans le cadre de la thèse d'Aurélien Azoug (DGA-CNRS), encadrée par A. Constantinescu et R.M. Pradeilles-Duval en collaboration avec Herakles-SNECMA. Les travaux ont permis de mettre en évidence des relations entre la physique des constituants à l'échelle microscopique et des propriétés mécaniques macroscopiques [Azoug *et al*, J.A. P.S. 2013], d'étudier le comportement viscoélastique non linéaire avec prédéformation [Azoug *et al*, P.T. 2013a] et leur identification [Azoug *et al*, P.T. 2013b]. Ce travail continue actuellement dans le cadre de la thèse de Dimitri Jalocha (Bourse DGA) avec des études d'homogénéisation numérique et de modélisation multiaxiale du comportement du propergol (Conférence Giens 2013).

La première étape d'une évaluation de la durée de vie est l'étude du comportement sous sollicitation variable et l'estimation de la réponse asymptotique. Dans ce cadre (CIFRE SNECMA), V. Courtier, A. Constantinescu et D. Rynckelnyck (Cdm Ecole des Mines) ont adapté par contrôle optimal des techniques de réduction de modèle à base réduite de type POD (proper orthogonal decomposition) pour les calculs élastoplastiques cycliques avec des applications en fatigue et en homogénéisation. Le but visé est la possibilité de choisir graduellement entre des simulations à qualité maîtrisée et des simulations à durée maîtrisée (quelques dizaines de min) pour un même modèle « éléments finis » de référence. La mise en œuvre de cette méthode a été menée dans le code CASTEM au cours du post-doc de L. Legrand en 2012 (6 mois) sur une structure plane entaillée sous la direction de C. Stolz. A. Benoit (CIFRE PSA), H. Maitournam et L. Rémy (Cdm Ecole des Mines) ont proposé des méthodes d'évaluation quantitative en multiaxial de la part de rochet et de déformation cyclique dans la réponse asymptotique des structures élastoviscoplastiques sous chargement thermomécanique cyclique [Benoit *et al*, IJF 2011]. Le Chenadec (CIFRE PSA), I. Raoult et C. Stolz ont étudié la réponse thermomécanique des élastomères sous chargement cyclique. Enfin, les derniers travaux concernent le problème thermomécanique couplé [Le Chenadec *et al*, JMMS 2009]. Lê Minh (CIFRE EDF), V. Doquet et H. Maitournam ont mis au point une méthode originale, combinant la méthode stationnaire et la propriété de périodicité pour rechercher directement (sans modéliser la phase transitoire) l'état périodique d'une fissure en propagation sous chargement cyclique [Lê Minh *et al*, IJF 2012].

Sur l'amorçage de fissures en fatigue thermomécanique, de nouveaux développements ont été effectués, notamment en collaboration avec PSA. Ainsi, des relations entre la distribution statistique de défauts microstructuraux des alliages d'aluminium et des critères de fatigue thermomécanique oligocyclique associant énergie dissipée et contrainte hydrostatique ont été établies dans le cadre de la thèse de S. Tabibian (CIFRE PSA) [Tabibian *et al* : IJF 2013, PE 2010], grâce à une collaboration entre PSA (F. Szmytka), le LML à Lille (E. Charkaluk) et le LMS (S. Tabibian, E. Constantinescu). De même, un modèle de durée de vie destiné à évaluer la tenue à la fatigue thermomécanique des structures soudées telles que les collecteurs en tôle d'acier a été proposé lors de la thèse de A. Benoit [Benoit *et al*, IJF 2011], en collaboration entre PSA (F. Oger), le Centre des Matériaux de l'École des Mines (L. Remy) et le LMS (H. Maitournam).

Dans le domaine de l'endurance limitée, plusieurs travaux [Bosia & Constantinescu, IJF 2012], [Maitournam *et al*, IJF 2011] ont utilisé des approches multiéchelles avec des lois de comportement de type Drucker-Prager écrouissable à l'échelle des grains, des techniques de recherche directe de cycle stabilisé (méthode cyclique directe, technique de type « saddle-node ghost ») pour aboutir à de nouveaux modèles de durée de vie.

Dans le domaine de la fatigue polycyclique en présence de forts gradients de contraintes, des travaux de fretting-fatigue en collaboration avec MTU Aeroengines (Allemagne) ont reçu le prix du meilleur papier à la conférence ASME Gas & Turbine 2009 (ASME Transactions 2010). D'autres travaux dans ce domaine ont concerné les connexions vissées avec des applications aux trains de tiges de forage pétrolier (Thèse Cifre IFP Mohamed Ferjani, IJFatigue 2011a, 2011b). Actuellement les travaux sur ce sujet se poursuivent dans le cadre du projet ANR FastFM (partenaires LTDS Lyon, LML Lille) et de la thèse d'E. Brustel (démarrée en 2013).

La propagation de fissure sous chargement thermomécanique cyclique anisotherme a été étudiée par E. Merhy dans le cadre de sa thèse CIFRE en collaboration entre PSA (Louis Augustins), le Centre des Matériaux de l'École des Mines (L. Remy) et le LMS (H. Maitournam). Les travaux ont conduit à la proposition d'une loi de propagation de fissure sous chargement thermomécanique anisotherme en fatigue oligocyclique, qui s'appuie sur des essais à différents rapports de charge, fréquences et températures.

La prise en compte des contraintes résiduelles et du pré-écrouissage sur la propagation des fissures de fatigue a été étudiée aussi bien expérimentalement que numériquement par M.B. Lê, dans le cadre de sa thèse CIFRE avec EDF SEPTEN dirigée par V. Doquet et H. Maitournam. Une démarche prédictive fondée sur une vaste campagne d'essais, une méthode numérique originale [Lê Minh *et al*, *IJF* 2012] et une meilleure prise en compte des effets de fermeture a été proposée.

Pour des situations en grandes déformations et en grandes vitesses, on a développé en collaboration avec le CEA DAM une stratégie de modélisation et de calcul de glissement inter matériaux s'adaptant à ces régimes. Pour des raisons de généralité et d'efficacité industrielle, le modèle doit pouvoir s'écrire dans un cadre Arbitrairement Lagrangien Eulérien Unique sur maillage unique ou superposés avec vitesses multiples. La stratégie a été appliquée avec succès dans le cas de maillages superposés et a permis de traiter des problèmes d'impact et de perforation (thèse F. Dambakazi). Elle a été développée en 2012 dans un cadre à maillage unique permettant de traiter des configurations très complexes avec changements importants de topologie en cours d'évolution (thèse G. Folzan).

Sur le plan thermodynamique, Q. S. Nguyen [Q.S. Nguyen : *CRM* 2011, *CRM* 2010, *ASSM* 2010] a étudié et proposé, dans un cadre unifié standard généralisé étendu, différents modèles standards de plasticité à gradient. Pour certains d'entre eux, une technique de régularisation a été proposée. Il a établi les équations variationnelles d'évolutions ainsi que les conditions d'unicité de la solution. En se fondant sur ces modèles, Duy Hao Luu, H Maitournam et Q.S. Nguyen ont développé d'une part des algorithmes d'intégration des modèles régularisés, d'autre part proposé de nouveaux critères de fatigues cohérents. Dans la même veine, en thermodynamique des matériaux à gradient de température ou d'entropie, en partant de la forme cohérente de la dissipation intrinsèque obtenue par Q. S. Nguyen et S. Andrieux dans le cadre de l'approche variationnelle, H. Maitournam [Maitournam, *CRM* 2012] a proposé une nouvelle forme de l'inégalité de la conduction utilisant selon les variables d'état adoptées, la définition variationnelle de la température ou de l'entropie.

Approches énergétiques ou variationnelles en mécanique non linéaire de la rupture et de l'usure

M. Bonnet, T.N. Lê, P. Le Tallec, J.J. Marigo, C. Stolz ; J. Guilie, V. Riolo, P. Sicsic (doctorants) ; C. Cyron, C. Gouttebroze (post-doctorant)

Dans le cadre des matériaux à endommagement brutal, pour lesquels la rupture intervient pour une valeur critique de l'élongation, C Stolz a produit un ensemble de solutions analytiques du problème de propagation de la zone rompue en mode anti plan [Stolz : Livre 2010, Stolz : *Entropy* 2010]. Pour les comportements hyper-élastiques isotropes incompressibles à endommagement brutal, cette approche a permis d'établir un critère de nucléation de défauts par une analyse de stabilité bifurcation avec imperfection (un défaut infinitésimal). Le cas du matériau élastique fragile a permis de montrer que pour une loi de propagation de défaut donnée (ici une déformation critique), le critère de nucléation établi dépend de la géométrie initiale du défaut infinitésimal [Stolz : Livre 2010]. C. Stolz a par ailleurs étendu la formulation variationnelle du problème en vitesse de la propagation des zones rompues en hyper-élasticité à endommagement brutal ou partiel [Stolz : Livre 2010].

Le problème d'évolution de la propagation de fissure en élasto-plasticité a été reformulé par C. Stolz dans le cadre des matériaux standards généralisés, après avoir étudié les intégrales primale J et duale I caractéristiques de la propagation et interprété ces intégrales en terme de taux de restitution d'énergie et d'intégrales invariantes [Stolz : *VJM* 2009]. La solution du problème en vitesse d'avancée de fissures et d'écrouissage est solution d'inéquations variationnelles, ces formulations primales et duales permettent d'étudier la stabilité-bifurcation d'un ensemble de fissures en interaction dans une structure [Stolz : *IJF* 2010, *Entropy* 2011]. Une analyse identique a été donnée en hyper-élasticité et en plasticité finie avec l'écriture de la formulation variationnelle du problème en vitesse [Stolz : Livre 2010].

Une autre approche a été développée en parallèle en termes d'endommagement diffus. C. Stolz a appliqué une approche par endommagement diffus, aux phénomènes d'usure de contact, caractérisés par la perte de matière entre deux solides en mouvement relatif. Les taux de restitution d'énergie associés à l'usure sont définis localement et dépendent des caractéristiques mécaniques des milieux sains et du milieu interface. [Stolz : *Entropy* 2010]. Cette

analyse conduit à un critère local intrinsèque pour étudier l'usure. Dans le même cadre de l'endommagement diffus, la propagation d'une bande de largeur finie permettant la transition douce entre le matériau sain et le matériau rompu a été étudiée par C. Stolz. Le lien avec la méthode des champs de phases, celle du second gradient et du rôle stabilisateur de la courbure sur la propagation est particulièrement analysé. Ces résultats récents permettent de proposer des méthodes numériques alternatives adaptées à la propagation de lignes de discontinuités mobiles [Moes *et al* : *IJNME* 2011].

De manière plus générale, la thèse Paul Sicsic (CIFRE Lafarge, 2013) en collaboration avec J.J. Marigo a permis d'approfondir tant du point de vue théorique que numérique le lien entre les modèles d'endommagement à gradient et la théorie de la rupture de Griffith. On a ainsi pu mettre clairement en évidence que la nucléation des fissures avec les modèles à gradient provenait d'un processus d'instabilité qui, couplé avec la propriété adoucissante de ce type de lois, conduisait par localisation de l'endommagement à l'apparition d'une surface de discontinuité au centre des bandes endommagées. Ces approches ont été utilisées, dans la thèse de Paul Sicsic et le post-doc de Camille Gouttebroze (ANR T-Shock 2012), pour traiter les problèmes de fissuration par choc thermique. On a en particulier montré comment ce processus d'instabilité et de localisation de l'endommagement conduisait à la **nucléation** d'un réseau **périodique** de fissures. La comparaison, tant qualitative que quantitative, faite avec les résultats expérimentaux issus d'essais sur des céramiques s'avère remarquable.

Christian Cyron (post-doc 2012) en collaboration avec J.J. Marigo a utilisé des modèles de fissure cohésive pour étudier la **nucléation** et la **propagation** de fissures lors d'un choc thermique. On a ainsi pu comparer les résultats prédits par cette approche avec ceux fournis par le modèle d'endommagement à gradient ou le modèle de Griffith (P. Sicsic, C. Gouttebroze) et ceux issus des expériences faites par les partenaires chinois de l'ANR T_Shock. Les deux faits marquants sont la capacité de ces modèles cohésifs (comme les modèles d'endommagement) à rendre compte de la répartition périodique des fissures et du phénomène de propagation par doublement de période caractéristique de ce type d'essai.

Joachim Guilie (CIFRE Michelin, directeur Patrick le Tallec) a consacré sa thèse à la rupture du caoutchouc naturel avec prise en compte de la cristallisation sous contrainte ; en collaboration avec Thiên-Nga Lê, un modèle énergétique a donc été construit au niveau de chaque chaîne dans le cadre des matériaux standards généralisés. Pour le passage micro-macro, on s'est placé dans le cadre de la microsphère, et obtenu ainsi une modélisation directionnelle, qui a été appliqué à des structures réelles et validé sur expérience.

Stockage souterrain

P. Bérest, H. Djakeun (à temps complet) ; V. de Greef, H. Gharbi, P. Valli (à temps partiel) ; L. Wang ; C. Lestringant, Y. Zhang, S. Maes (élèves X stagiaires).

Les applications traditionnelles de la Mécanique des Roches concernent l'exploitation des minerais et du pétrole, les barrages, la stabilité des pentes rocheuses et les tunnels profonds. Depuis une trentaine d'années, l'intérêt s'est élargi au stockage de fluides, dont les hydrocarbures, et à l'enfouissement définitif des déchets industriels ou radioactifs. Ces activités sont marquées par trois caractéristiques : les durées parfois très grandes pendant lesquelles la sécurité doit être assurée, l'importance de la préoccupation d'étanchéité et les inquiétudes qu'elles engendrent souvent dans la population. Cette dernière caractéristique explique que le laboratoire soit très fortement sollicité pour des expertises demandées par les pouvoirs publics français et parfois étrangers. Les deux premières justifient une attention accrue aux phénomènes mécaniques très lents à l'œuvre dans le sous-sol, aux très faibles perméabilités et à leur mesure en forage, aux relations entre perméabilité et état de contraintes.

Le devenir à très long terme des cavités réalisées dans le sel, abandonnées après avoir été remplies de saumure saturée, fait l'objet de trois essais en place de longue durée à Etrez (avec Storengy), à Carresse (avec TIGF) et à Gellenoncourt (avec CSME). Les évolutions confirment le résultat formulé il y a une quinzaine d'années : la pression de saumure atteint une valeur d'équilibre, très stable, pour laquelle le débit de saumure sortant par les parois équilibre exactement la vitesse de fermeture de la caverne par fluage du sel.

Les vitesses de fermeture mises en évidence au cours de ces essais sont extrêmement faibles, de l'ordre de $\varepsilon = 3.10^{-13} s^{-1}$ à Gellenoncourt, par exemple. Ce résultat justifie le développement des essais de fluage sous très faible charge. La difficulté principale de ces essais tient aux déformations thermoélastiques parasites : au laboratoire, il est difficile d'éviter une variation de température de, par exemple, $1^\circ C$ par jour, soit une vitesse de déformation thermo-élastique de $\alpha T = 4.10^{-10} s^{-1}$ bien plus rapide que ce que l'on tente de mesurer. On se place donc dans une galerie souterraine profonde (grâce à l'aide de CSME) où la température est stable au $1/100^\circ C$. Dans le cadre d'une

collaboration avec le bureau d'études américain RESPEC, on y réalise des essais de fluage multi-paliers sur du sel de la mine d'Avery Island.

Le stockage d'air comprimé en cavité saline, en aval de sources intermittentes de stockage, fait l'objet d'un projet ANR coordonné par le LMS. Il comprend des essais de fluage cycliques en extension et l'analyse du comportement thermodynamique de cavernes dans lesquelles les pressions d'air varient rapidement. Ce second thème a conduit à s'intéresser (avec B. Brouard) au sujet de l'éruption, ou vidange rapide d'une cavité à la suite d'une rupture de tête de puits. Le cas de l'hydrogène était particulièrement intéressant, à cause de l'effet Joule-Thomson, mais on a aussi étudié (pour le SMRI, avec B. Brouard et A. Frangi de Politecnico di Milano) un cas réel, l'éruption sur une cavité de stockage de gaz naturel à Moss Bluff (Texas). L'analyse thermodynamique permet d'évaluer les contraintes thermoélastiques engendrées à la paroi et ses conséquences pour sa dégradation éventuelle par création de fractures de traction potentiellement dommageables pour l'étanchéité de la caverne, étude qui a été conduite avec l'aide de P. Sicsic ; des essais de laboratoire ont été réalisés pour Storengy. Un thème analogue est celui de l'effet d'une montée très rapide de la pression dans une caverne en gaz, qui engendre des contraintes de traction effective ; on a revisité des essais anciens en caverne à la lumière de ce résultat.

L'examen de la stabilité d'un tube de plusieurs centaines de mètres de haut qui pend librement dans une caverne dans le sel (« hanging string ») a donné l'occasion de résoudre le problème du flambage d'une colonne pesante soumise en son extrémité basse à une force verticale orientée vers le haut.

Divers procédés de mesure en puits ont été mis au point, notamment à l'occasion d'essais *in situ*, en collaboration avec B. Brouard. Il s'agit, d'une part, de la mesure des très faibles perméabilités en fonction de la profondeur, obtenue en balayant le puits par une interface entre liquides léger-visqueux et lourd-non visqueux (avec Total) ; et, d'autre part, de la mesure de la profondeur d'une interface entre deux fluides en analysant le signal enregistré en surface à la suite de la propagation d'une discontinuité de pression (avec le concours de G. Gary). Ce dernier procédé a suscité un intérêt marqué dans la profession.

Le LMS a co-organisé, avec l'École des Mines de Paris, la 7^{ème} *Conference on the Mechanical Behavior of Salt*, qui s'est tenue en avril 2012.



Installation de bâtis de fluage dans une galerie en cul-de-sac de la mine de Varangéville

(Remerciements : CSME)

Problèmes inverses, identification, dynamique et stabilité

M. Bonnet, X. Boutillon, H.D. Bui, A. Constantinescu, P. Le Tallec, J. Salençon, N. Triantafyllidis (permanents) ; A. Alarcon, C. Bellis, S. Chaillat, C.T. Chatzigogos, K. Ege, E. Grasso, E. Lignon, M. Rébillat (doctorants), T. Putelat (post-doctorant)

Problèmes inverses

Dans ce domaine, notons que la solution exacte du problème sismique, le véritable problème sismique (et non pas celui traité en 2006 par H.D. Bui (livre chez Springer), qui supposait la connaissance du champ lointain dans un massif semi-infini) a été trouvée par H.D. Bui, A. Constantinescu et H. Maigre [JMMS 2012]. Elle repose sur l'idée que seules les ondes issues de la source sismique sont considérées, sans les ondes réfléchies par l'interface croûte terrestre et milieu pâteux en dessous (interface Mohorovicic). Les mesures d'accélération au sol sont faites dans un

temps. H.D. Bui a aussi étudié le problème de détection de fissure en 3D en tenant compte du contact unilatéral sur la fissure. H.D. Bui, S. Chaillat, A. Constantinescu et E. Grasso ont étendu l'identification des fissures par la méthode d'écart à la réciprocité en 3D avec des données surabondantes sur le bord en viscoélasticité dynamique à basse fréquence [Bui *et al*, *ASSM* 2010].

Lors de la thèse d'Eva Grasso dirigée par M. Bonnet et J.F. Semblat (LCPC), une extension de l'approche accélérée par multipôles rapides des éléments de frontière au cas élastoviscodynamique [Grasso *et al*, *EABE* 2012] a été proposée et couplée avec les éléments finis en vue d'applications en simulation géodynamique. C. Bellis et M. Bonnet ont développé des approches non-itératives destinées à l'identification de défauts : la Linear sampling method (LSM) et la méthode du gradient topologique [Bellis & Bonnet : *CMAME* 2013, *IJSS* 2010 ; Bellis *et al* : *WM* 2013, *JE* 2010].

Une stratégie d'identification en dynamique des structures pour estimer des caractéristiques de structures susceptibles d'évoluer dans le temps, associant le filtrage de Kalman et l'erreur en relation de comportement a été mise au point lors de la thèse d'A. Alarcon (CIFRE EDF) dirigée par M. Bonnet.

Suite au séjour invité d'A. Constantinescu au Tokyo Institute of Technology une collaboration informelle a été lancée avec le Prof. K. Kishimoto et J. Prou sur des problèmes d'indentifications des propriétés mécaniques par indentation et les techniques classiques d'Oliver et Pharr ont été modifiées [*Theoretical and Applied Mechanics Japan*, 2012].

Andrei Constantinescu a proposé une expérience « table-top » de tomographie électrique et en collaboration avec C. Bellis et des élèves de l'Ecole polytechnique ont utilisé une méthode de linear sampling sur l'espace de bruit pour localiser des fissures. (*Inverse Problems*, 2012).

Stabilité des matériaux périodiques

Une analyse modale a été appliquée dans un cadre statique par P. Le Tallec, E. Lignon et N. Triantafyllidis à l'analyse du comportement de structures périodiques fibrées. Elle a aussi été adaptée aux matériaux périodiques cellulaires. Le but de cette recherche est de trouver les charges critiques et modes de bifurcation correspondants sous chargements complexes (compression axiales et cisaillements transverses) de structures prismatiques en 3D. La nouveauté de cette recherche consiste à utiliser le théorème de représentation de Bloch qui nous permet de trouver la charge correcte et le mode en utilisant seulement une cellule unitaire. En plus, le fait que dans le cas du chargement 3d sous compression axiale la solution principale n'implique pas la flexion des parois permet une solution analytique du problème, rendant ainsi possible une analyse paramétrique du modèle développée par F. Lopez-Jimenez & N. Triantafyllidis. (*IJSS*).

Stabilité des Solides sous Grands Taux de Déformation

La stabilité des structures chargées en dynamique est habituellement traitée avec des outils de l'analyse statique qui utilisent les modes propres de toute la structure et sélectionnent celui qui présente le plus fort taux de croissance. Cette approche modale, valable pour les problèmes de vibrations, n'est pas adaptée aux problèmes de structures subissant des chargements impulsionsnels. Le problème de la stabilité des structures sous chargement impulsionsnel a été reformulé en étudiant l'évolution des perturbations superposées à une solution transitoire du problème global de la structure. Ces résultats ont été confrontés à des essais récents effectués sur des anneaux métalliques sous compression électromagnétique. Ils ont montré des mécanismes de rupture localisés, différents de ceux rencontrés en quasi-statique ou à faible vitesse de chargement. Une collaboration a démarré avec le Prof. K. Ravi-Chandar de l'Université de Texas, Austin aux USA, lors de son séjour sabbatique au LMS. Ce point fondamental est illustré dans une récente publication à l'*International Journal of Solids and Structures* par T. Putelat & N. Triantafyllidis qui ont choisi comme structure modèle un anneau élastique soumis à une pression hydrostatique externe appliquée à différentes vitesses (proprement adimensionnées par rapport à la vitesse de l'onde élastique axiale). La stabilité de l'anneau est étudiée en suivant l'évolution d'une petite perturbation localisée. On a montré que pour des petites valeurs de la vitesse du chargement appliqué, la défaillance de structure survient selon un mode global, alors que pour des valeurs élevées, elle se fait selon un mode de déformation localisée. Un temps de localisation obtenu analytiquement se révèle être une bonne estimation du temps d'apparition de l'instabilité à fortes vitesses de sollicitations.

Problèmes vibratoires

Les tables d'harmonie d'instrument de musique posent d'intéressants problèmes vibratoires liés aux amortissements et aux non-linéarités. Deux méthodes de caractérisation expérimentale ont été mises au point.

L'analyse modale haute résolution permet d'accéder à des modes propres amortis à des fréquences largement supérieures à celles résolues par l'analyse conventionnelle. Elle nous a permis d'identifier les paramètres élastiques et dissipatifs des composants de plaques sandwichs par le moyen d'un essai vibratoire très simple à mettre en œuvre. Elle a aussi permis de caractériser le comportement vibratoire de la table d'harmonie de piano dans une bande de fréquences environ 10 fois plus large qu'auparavant. Cette étude expérimentale a ensuite permis d'élaborer un modèle vibratoire semi-analytique des tables d'harmonie de piano.

La modélisation de la réponse vibratoire d'une structure en cascade de modèles de Hammerstein permet d'en caractériser les non-linéarités. Cette dernière méthode a permis de résoudre une question posée depuis longtemps sur les tables d'harmonie de piano, violon ou guitare. En outre, elle permet de distinguer la non-linéarité propre à la structure de celle due au dispositif qui l'excite. Une étude menée dans le cadre de l'opération Mécanique et systèmes vivants par B. Theckes (doctorant, LadHyX), E. de Langre (LadHyX) et X. Boutillon (LMS) a également mis en évidence un mécanisme spécifique d'amortissement vibratoire non-linéaire des troncs de structures branchées. L'énergie vibratoire du tronc est transférée aux branches, où se dissipe effectivement l'énergie. Le mécanisme est robuste vis-à-vis des paramètres de la structure ou du type de dissipation. La présence de plusieurs ordres de ramification n'augmente que marginalement le transfert d'énergie.

Dimensionnement sous sollicitation sismique

Outre l'approche quasi-statique du dimensionnement sous sollicitation sismique, le concept de dimensionnement fondé sur la performance est maintenant utilisé. Il nécessite de disposer d'une modélisation de l'ouvrage - fondation + interface + sol de fondation - qui permette d'en suivre la réponse au cours du séisme afin d'en évaluer la position à l'issue de celui-ci. À cet effet, avec Alain Pecker et Charisis Chatzigogos, Jean Salençon [Chatzigogos *et al* : SDEE 2009, IJAM 2010, *Geotechnique* 2011 ; Pecker *et al*, 2009] a développé un modèle de macroélément dynamique qui modélise de façon indépendante chacun des mécanismes non-linéaires qui interviennent dans la réponse globale du système : glissement à l'interface, rupture du sol et décollement de la fondation.

2.1.3. Problèmes multidisciplinaires

Les aspects multidisciplinaires ont été développés dans trois axes. Le premier axe concerne la plasticité et l'endommagement, avec l'étude des interactions entre défauts multiples et leur auto-organisation pour former des structures régulières ou fractales. L'originalité est de ne pas regarder le comportement individuel des défauts, mais au contraire d'apporter des techniques rigoureuses de passage entre les aspects mésoscopiques (fissures, dislocations) et macroscopiques (avec les aspects de dissipation inélastique).

Le deuxième axe de recherche sur les couplages magnétorhéologiques étudie le comportement de ces matériaux qui sous forme solide ou fluide répondent aux champs extérieurs par mise en place de microstructures internes complexes, dont on étudie la stabilité. Ceci conduit à toute une gamme d'applications industrielles allant des écrans plates aux systèmes photovoltaïques.

L'objectif du troisième axe de recherche portant sur les systèmes actifs et sur la biomécanique est de comprendre les principes fondamentaux gouvernant le fonctionnement mécanique des cellules vivantes et des tissus. Cela inclut des aspects de mécanotransduction, d'élasticité active des muscles, de motilité cellulaire, ou de segmentation vertébrale.

Autoorganisation des défauts et criticalité

A. Constantinescu, J.J. Marigo, L. Truskinovsky

Le recours à des méthodes asymptotiques est quasi-systématique dans toutes nos modélisations car les modèles de comportement ou les structures étudiées comportent des petits paramètres géométriques ou matériels. Nous présentons ici quelques activités de recherche dans lesquelles le développement de ces méthodes constituait le cœur de la problématique.

Martin David en collaboration avec J.J. Marigo a développé dans sa thèse (CIFRE EDF R&D, 2012, prix de thèse Ecole Polytechnique) l'étude asymptotique du comportement mécanique des aciers dans une structure en **béton armé**. Deux modèles asymptotiques ont été proposés, tous deux basés sur l'approche développée dans le cadre de l'ANR « epsilon ». Le premier permet de décrire le comportement effectif d'hétérogénéités périodiquement réparties sur une surface. Il combine un comportement d'interface élastique et un comportement de membrane. Le second modèle est plus spécifiquement adapté à la modélisation de fibres rigides réparties sur une surface et susceptibles de

glisser par rapport au volume environnant. Ces modèles sont implémentés dans le code éléments finis Code_Aster et validés par rapport à des simulations tridimensionnelles de référence.

Parallèlement il a été démontré pour la première fois que le taux hystérésis indépendant peut apparaître comme un résultat de l'homogénéisation temporelle et spatiale dans un modèle avec un comportement dépendant de la vitesse. U. Salman (postdoc, ANR EVOCRIT, 2010) en collaboration avec L. Truskinovsky présente une première explication détaillée de la loi de puissance de l'émission acoustique et de la criticité en plasticité cristalline des cristaux fcc et hcp. Le modèle contient une nouvelle méthode sans discontinuité de représentation des dislocations cristallines et il reproduit qualitativement toutes les observations expérimentales essentielles y compris les fluctuations de flux et leur statistique. Pour retrouver ces fluctuations, un modèle mésoscopique minimal a été développé pour élucider l'origine de ce comportement « sans échelle » en plasticité. Il a été montré qu'un modèle bidimensionnel est déjà suffisant pour décrire la loi de puissance statistique des avalanches et le caractère fractal des modes des dislocations. En plus des valeurs réalistes des exposants critiques, le modèle 2D minimaliste génère des fonctions de forme qui sont en accord avec les observations.

F. J. Perez-Reche (postdoc, ERC, 2008) en collaboration avec L. Truskinovsky a étudié les statistiques d'avalanches dans les transformations martensitiques. Il est démontré que la compétition entre la rigidité élastique qui favorise les événements de transformation synchronisée, et la plasticité qui favorise l'évolution du désordre joue un rôle crucial dans les statistiques des avalanches. Les distributions à queues épaisses de taille d'avalanche sont reproduites par le modèle dans une vaste région de l'espace des paramètres, en accord avec les expériences.

Le but de projet A. Constantinescu and L. Truskinovsky est d'observer la criticité dans des modélisations numériques concrètes, ce qui donne des informations sur la structure statistique des fluctuations pouvant être utilisées pour prédire la durée de vie d'une structure.

K. Danas étudie, en collaboration avec V.S. Deshpande et N. Fleck (University of Cambridge, UK), la plasticité aux échelles nano- et micrométriques par des méthodes discrètes de dynamique des dislocations. De nouveaux résultats ont été obtenus pour le cas de dynamique des dislocations avec la montée où l'on montre que la présence des mécanismes de montée peuvent conduire à une diminution des effets de taille dans certains cas de chargements ou augmenter la dissipation dans d'autres.

P. Lloveras (postdoc ANR Alice) en collaboration avec L. Truskinovsky a piloté la première étude expérimentale des phénomènes d'intermittence et d'avalanches pendant une crise d'ébullition. Ils ont montré qu'une émission acoustique pendant une crise d'ébullition obéit statistiquement à une loi puissance. Pour comprendre l'émergence de cette criticité, un modèle simple a été mise en œuvre capturant l'exposant critique mesuré. Le modèle suggère que derrière le flux de chaleur critique, il y a un phénomène d'infiltration impliquant une compétition de séchage-réhumidification proche de la surface chaude. En particulier, cela signifie que la structure détaillée d'un flux hydrodynamique macroscopique dans la zone liquide est d'une importance secondaire pour le poudrage critique.

Matériaux et problèmes en multi-physique

L. Bodelot, X. Boutillon, K. Danas, N. Triantafyllidis

La recherche sur des matériaux actifs, et plus précisément de l'influence des sollicitations mécaniques sur les propriétés électromagnétiques ou électroniques des solides est une activité récente au LMS. La recherche comporte trois axes : a) élastomères et fluides magnétorhéologiques, b) élastomères nématiques et cristaux liquides et c) effets des contraintes sur les semiconducteurs avec application aux couches photovoltaïques flexibles. Cette dernière recherche implique une collaboration - la première entre les deux laboratoires - entre le LMS et le LPICM

Élastomères et fluides magnétorhéologiques

Les élastomères magnétorhéologiques (MREs) sont des gommages élastiques (caoutchouc, silicones) imprégnées de particules ferromagnétiques et dont les propriétés mécaniques sont altérées par l'application d'un champ magnétique externe. En utilisant le cadre théorique pour les MREs en déformation finie Triantafyllidis et al. ont proposé une fonction de densité d'énergie transversalement isotrope qui est capable de reproduire l'aimantation expérimentalement mesurée, la magnétostriction, et les courbes de cisaillement simple sous différentes précontraintes, les orientations de la chaîne de particules initiale et les champs magnétiques. Les mécanismes microscopiques sont aussi proposés pour expliquer i) l'effet paradoxal de la dilatation sous les charges mécaniques appliquées ou à la compression pour les expériences de magnétostriction et ii) l'importance d'une formulation constitutive de déformation finie, même à petites déformations magnétostrictives. Le modèle donne un excellent accord avec les expériences à des champs magnétiques relativement modérés, mais a également été étendu de

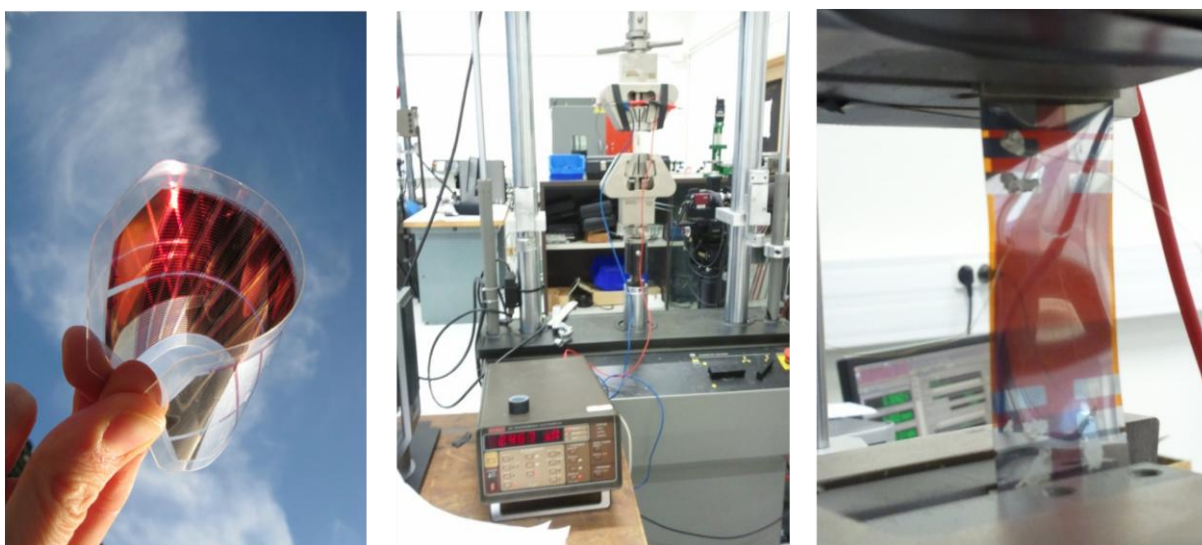
manière satisfaisante pour inclure des champs magnétiques proches de la saturation. K. Danas étudie, en collaboration avec O. Lopez-Pamies (University of Illinois à Urbana-Champaign), la modélisation des polymères renforcés électroactifs. K. Danas continue à collaborer avec L. Bodelot et N. Triantafyllidis sur le projet des matériaux magnétorhéologiques. Un logiciel aux éléments finis pour résoudre des problèmes couplés magnéto- et électromécaniques a été écrit. De nouveaux micro-mécanismes de déformations et des instabilités à l'échelle microstructurale ont été observés.

X. Boutillon en collaboration avec J. Lozada (Laboratoire d'Interfaces Sensorielles et Ambiantes, CEA-LIST) et W. Nassar (doctorante) ont élaboré une machine d'essais pour caractériser la rhéologie de fluides magnétorhéologiques (FMR) au-dessous du seuil d'écoulement. Trois régimes de cisaillement apparaissent successivement, tous indépendants du taux de cisaillement : un régime pseudo-élastique, réversible et indépendant de l'état initial, dont le module est indépendant du champ magnétique appliqué ; un régime pseudo-plastique, hystérétique ; un régime de glissement à la surface d'entraînement du FMR. Les seuils entre régimes et le module du régime de pseudo-plasticité sont proportionnels au carré du champ magnétique appliqué. La formation, l'évolution et la destruction des agrégats magnétiques ont été étudiées à l'échelle micrométrique, ainsi que la dépendance (ou non) des comportements avec le taux de particules et de la taille des agrégats.

Élastomères nématiques et cristaux liquides

Les élastomères nématiques sont des solides de type caoutchouc formés par les chaînes polymères de réticulation qui incluent des molécules de cristaux liquides. L'interaction entre l'élasticité du caoutchouc du réseau et l'alignement des molécules de cristaux liquides conduit à des propriétés particulières qui rendent les élastomères nématiques un matériau prometteur pour des applications comme les actionneurs souples rapides et des muscles artificiels. La modélisation des phénomènes de stabilité présentés par les dispositifs électromécaniques ci-dessus en utilisant le mécanisme de la théorie de la bifurcation pour des problèmes aux limites en mécanique des milieux continus non linéaires a fait l'objet de travaux de N. Triantafyllidis en collaboration avec G. Pampolini. Plus précisément, une formulation variationnelle de Lagrange pour une ligne nématique qui représente un couplage électromagnétique est présentée. Une énergie potentielle en fonction de quatre variables (le déplacement, le directeur, la polarisation spécifique et la perturbation de déplacement électrique) est construite par N. Triantafyllidis en collaboration avec G. Sfyris (post doc CNRS-EP). La théorie est adaptée en général pour les élastomères nématiques ainsi que les cristaux liquides nématiques. La formulation variationnelle est appliquée à l'étude de la stabilité d'un bloc rectangulaire infini d'un cristal liquide nématique confiné entre deux plaques et soumis à un champ électrique perpendiculaire aux plaques.

Effets des contraintes sur les semi-conducteurs avec applications aux couches photovoltaïques flexibles



Modélisation multiphysique des semi-conducteurs sous chargement

Gauche: couche PV flexible; Centre: Dispositif pour déterminer la résistivité des semi-conducteurs ; Droite: Echantillon testé

Un développement récent dans l'industrie photovoltaïque implique le dépôt de couches minces photovoltaïques sur des couches flexibles. Suite à une collaboration de N. Triantafyllidis avec les laboratoires de recherche de Dupont en Suisse sur les films photovoltaïques flexibles, on a mis en évidence l'effet des déformations mécaniques sur le rendement des cellules PV. L'origine du phénomène est liée à l'influence des contraintes sur la mobilité électronique des semi-conducteurs. Suite à ces travaux, N. Triantafyllidis a commencé une collaboration avec P. Roca-i-Cabarrocas du laboratoire PICM de l'Ecole Polytechnique. Un autre doctorant, S. Bosia travaille sur les aspects théoriques de ce phénomène avec A. Constantinescu et N. Triantafyllidis. Le travail sur la modélisation continue du couplage mécanique-électrique-électronique des semi-conducteurs a considérablement avancé avec la collaboration de M. Jabbour (Université du Kentucky). Une théorie continue du phénomène, basée sur la thermodynamique de ces systèmes dissipatifs, a été proposée et appliquée aux jonctions p-n.

Mécanique et systèmes vivants

JM. Allain, X. Boutillon, L. Truskinovsky, P. Le Tallec

Mécanique et morphogénèse des tissus biologiques.

Une étude réalisée entre 2008 et 2011 par J.M. Allain, J. Crépin (jusqu'à son départ du LMS) et Viet Tran (post-doctorant) en collaboration avec le service de Neurochirurgie de l'hôpital Lariboisière a porté sur les propriétés mécaniques de la dure-mère, avec une attention particulière sur l'effet d'une hétérogénéité de composition dans l'épaisseur du tissu. Un dispositif original pour l'étude multi-échelle des tissus a été mis au point, qui combine un système de traction (uni- ou multi-axial) avec un microscope optique non-linéaire permettant d'imager en volume et sans marquage les fibres de collagène constituant le tissu. En biologie des tissus, l'intérêt majeur de ce type de projet est de mieux comprendre l'effet des modifications locales du tissu sur son comportement global : lors de cicatrifications, lors de modifications pathologiques du tissu et pour la fabrication de tissus de remplacement.

Dans le cadre du projet ANR Senzo, une étude a été menée par C. der Loughian (doctorante) avec B. Moulia (UMR Piaf, INRA), E. de Langre (LadHyX) et J.M. Allain, sur la modification de croissance des arbres due à des sollicitations mécaniques. En particulier, l'effet de la fréquence de sollicitation en flexion a été étudiée, pour reproduire l'effet du vent sur une plante. Nous avons aussi développé un modèle macroscopique de la plante qui permet de reproduire quantitativement la modification de croissance de la plante lors d'une sollicitation mécanique. De plus, nous développons un modèle de la perception à l'échelle d'une cellule unique de l'arbre, basée sur la réponse de canaux ioniques sensibles à la tension membranaire.

Les lézards et insectes peuvent s'attacher fortement puis se détacher en appliquant une force supplémentaire négligeable. L. Truskinovsky en collaboration avec F. Maddalena, G. Puglisi, U. Bari, Italy; D. Parsivale, U. Genova, Italy propose un simple modèle mécanique de ce phénomène ce qui implique un contrôle musculaire actif. Nous avons montré que la force de détachement pouvait dépendre non seulement des propriétés des unités adhésives, mais également de l'interaction élastique entre ces unités. La possibilité de l'adhésion des trajets multiples réconcilie une forte liaison avec une désunion facile ce qui représente la base de l'agilité observée des lézards et insectes courants sur des surfaces inclinées. Le mécanisme proposé à une structure sans échelle hiérarchique, ce qui est typique des systèmes biologiques à tous niveaux d'organisation.

La segmentation est une caractéristique d'un vertébré. Le paradigme dominant pour son origine est le modèle « clock and wave-front », dans lequel un oscillateur génétique interagit avec un gradient de morphogènes qui se déplace pour définir les limites spatiales des segments. G. Vitale (postdoc LMS) en collaboration avec L. Truskinovsky, T. Smit, FU Amsterdam, Pays-Bas, ont proposé un modèle mécanique alternatif de segmentation des vertébrés qui implique une instabilité mécanique d'un matériau adoucissant soumis à une charge de traction. La formation de motifs périodiques est induite par la croissance différentielle du mésoderme tendu en tenant compte de la matrice environnante.

Perception humaine

Dans le cadre d'une collaboration avec le LMSI et sonic emotion, M. Rébillat (doctorant puis maître de conférences, ENSAM Paris) et X. Boutillon ont mis en évidence l'effet d'ancrage dans la perception de la distance de la source de stimuli audio-visuels d'origine virtuelle : pour des stimuli rendus quasi-semblables (par holophonie et vision 3D) à ceux qui proviendraient d'une source réelle arbitrairement éloignée, les lois de perception visuelle et sonore sont analogues à celles observées pour l'émission par un objet réel. Toutefois, l'ancrage dans la réalité matérielle se manifeste par le fait que l'un des paramètres principaux de ces lois de perception prend pour valeur la distance entre le sujet et le dispositif matériel (écran et hauts-parleurs) qui génère les stimuli.

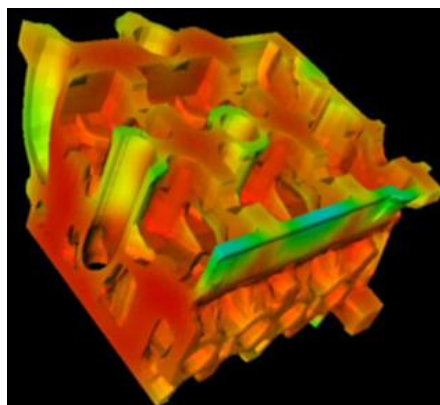
2.2. Actions spécifiques

2.2.1. Chaire « André Citroën »

La « **Chaire André Citroën** » a été inaugurée le 6 mai 2011 à L'Ecole Polytechnique dans le cadre d'une convention signée entre PSA Peugeot Citroën, l'Ecole Polytechnique et la Fondation de l'Ecole Polytechnique. Dotée d'un budget annuel de 270000 €, elle est dédiée au développement de thématiques liées aux **matériaux et aux structures mécaniques**, à la **physique des surfaces**, à la **modélisation numérique** et aux **couplages multi-physiques**. Elle s'appuie sur le « Laboratoire de Mécanique des Solides » (LMS) et le « Laboratoire de Physiques des Interfaces et des Couches Minces » (LPICM). Elle vient renforcer et dynamiser les liens scientifiques étroits et la collaboration fructueuse établis depuis plusieurs décennies entre PSA et l'Ecole polytechnique, et plus particulièrement entre PSA et le LMS. Depuis la fin des années 80, jusqu'à aujourd'hui, une vingtaine de thèses de doctorat CIFRE ont ainsi été soutenues. Les travaux de recherche de la chaire s'inscrivent dans un **environnement international** : en collaboration avec l'Université PSA Peugeot Citroën, la « Chaire André Citroën » débouche sur des coopérations et des accords internationaux avec des universités américaines, chinoises ou brésiliennes, facilite l'accueil de professeurs internationaux, favorise l'échange d'étudiants et donne lieu à des conférences internationales. Outre la recherche, la « Chaire André Citroën » développe aussi l'**enseignement** en encourageant notamment des initiatives dans le **domaine de l'automobile**. Elle permet aux étudiants accueillis au sein du Groupe d'être confrontés à des situations d'**innovations technologiques** caractéristiques.

Parmi les actions de la chaire, notons

1. Coopération universitaire internationale : trois cibles internationales ont été retenues (Caltech (USA), Wuhan et Jiao Tong en Chine, et l'Université de Rio de Janeiro au Brésil) des missions et des séjours ont été financés. H. Maitournam a ainsi effectué un séjour d'un an à Caltech, pris en charge en partie par la Chaire.
2. Accueil de professeurs étrangers : Michel Jabbour de l'Université du Kentucky pour six mois.
3. Bourses de stage post-doctoral : des stages post-doctoraux ont été financés depuis le démarrage de la Chaire (au LMS, sur l'analyse de stabilité des structures sandwiches : Francisco Lopez Jimenez doctorant de Caltech, et au LPCIM deux stages sur les thèmes de nanocapteurs à base de tubes de carbone).
4. Financement de séjours de chercheurs à l'Etranger
5. Organisation d'événements scientifiques :
 - a. Séminaire Jean Mandel : organisé une fois par an, depuis 2012. En 2012 le parrain scientifique était le Prof K. Ravi-Chandar de l'université d'Austin-Texas et en 2013, le professeur R. D. James de l'Université du Minnesota.
 - b. Le Congrès des 50 ans du LMS
 - c. La Semaine de la Science : visite par les élèves du LMS et de l'OpenLab avec présentation des problématiques et innovations automobiles.
6. Prix de stage de recherche : le prix André Citroën récompense le meilleur stage de recherche de l'Ecole Polytechnique en modélisation mécanique et physique.
7. Parrainage d'élèves : Felipe Contatto élève ingénieur brésilien de l'Ecole est boursier de la Chaire
8. Contribution à l'achat de matériel (ordinateurs de calcul) et de logiciel (Abaqus, Digimat)
9. Recrutement d'une attachée temporaire de communication



Calcul thermomécanique d'un bloc moteur et modélisation en fatigue

2.2.2. OpenLab Computational Mechanics

L'OpenLab « Computational Mechanics » a été inauguré le 9 décembre 2011. C'est un laboratoire commun qui regroupe des ingénieurs et chercheurs de PSA, de l'Ecole Polytechnique et du Centre des Matériaux de l'Ecole des Mines ainsi que des chercheurs invités de renommée internationale. Son programme scientifique centré sur la modélisation numérique des matériaux et des structures, est structuré en quatre axes de recherche et d'innovation :

- Comportement et durabilité des structures : appréhender les phénomènes de fatigue des structures sous sollicitations mécaniques variées, couplées à d'autres sollicitations (thermique, physico-chimique...)
- Matériaux composites pour applications structurales : explorer un levier nouveau dans le domaine automobile pour réussir le challenge de la réduction de la masse
- Méthodes numériques : imaginer des outils de plus en plus efficaces pour simuler les processus multi-physiques (couplages, simulation des procédés, modélisation multi-échelle...) et le comportement mécanique des structures
- Milieux complexes : explorer des solutions matériaux nouvelles pour l'automobile de demain (matériaux multifonctionnels, matériaux micro- ou nano-structurés, matériaux pilotables...)

Deux bureaux et une salle de conférence ont été spécifiquement dédiés à cet OpenLab au Laboratoire de Mécanique des Solides à l'Ecole Polytechnique, avec mise à disposition de badges d'accès et de comptes informatique à tous les membres.

2.2.3. Mécanique et systèmes vivants

L'opération « Mécanique et Systèmes vivants » est un projet lancé en 2009, inauguré officiellement en septembre 2011. C'est une initiative conjointe du LadHyX et du LMS dans le cadre du Département de Mécanique, soutenue par la Direction de la Recherche de l'Ecole polytechnique. Elle a pour objectif la mise en place effective de nouvelles équipes dans le domaine de la mécanique et des systèmes vivants, en lien avec l'opération "Biologie et Interfaces" de l'Ecole polytechnique. C'est une structure légère et temporaire permettant une animation scientifique inter-laboratoires, un regroupement de moyens expérimentaux et une visibilité accrue des actions dans ce domaine. Les personnels impliqués restent membres de leur laboratoire d'origine.

Son projet scientifique initial est centré sur la mécanoperception en modélisation et génie cellulaire, en haptique, en biomécanique et en biomimétique végétale. Des moyens importants ont été mis en place par l'Ecole polytechnique avec 400 m² de locaux du LMS dont 200 m² de nouveaux laboratoires au bâtiment 65. A l'origine étaient concernés 5 permanents, au Ladhyx A. Barakat, E. de Langre, P. Hémon, et au LMS X. Boutillon et J. M. Allain. Plus récemment J. Husson et A. Babataheri ont été recrutés dans ce cadre. Aujourd'hui, l'opération concerne également une grande partie de l'activité de C. Baroud. L'équipe M3DISIM de l'INRIA, avec D. Chapelle et P. Moireau, implantée depuis peu sur le campus, a également rejoint l'opération en 2012.

Dans le cadre de l'opération ont été réalisés à ce jour environ 34 séminaires avec des intervenants extérieurs, 20 séminaires internes, 15 publications dans des revues à comité de lecture, et 5 thèses ont été soutenues. Les membres de l'opération sont impliqués en tant que tels dans plusieurs projets coopératifs sur le plateau de Saclay (projet IDEX IMSV, Labex LASIPS) ou au niveau national (ANR).

2.3. Rayonnement et attractivité académiques

Le laboratoire est un centre de recherche en mécanique des milieux continus, avec une triple compétence modélisation, expérimentation calcul. Sa reconnaissance nationale se matérialise par sa participation à de nombreuses ANR (10 recensées à ce jour), par la présence d'une chaire industrielle (Chaire André Citroën de Modélisation Mécanique et Multiphysique) et par un volume significatif de contrats de recherche industriels à long terme.

Le LMS est très actif au niveau du plan campus Paris-Saclay. Acteur de l'Equipex MATMECA, membre du Labex LASIPS (Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur du Plateau de Saclay), il participe actuellement à la mise en place du département de Sciences Mécaniques, Energétiques, et Matériaux et de l'École Doctorale associée. Ses membres sont très impliqués dans les instances de gouvernance de l'École, du plateau, dans le sénat académique, et dans les conseils scientifiques et instances du CNRS ou CEA: Véronique Doquet est membre du conseil scientifique de l'INSIS, Andrei Constantinescu et Patrick Le Tallec y sont chargés de mission, Patrick Le Tallec est membre du conseil scientifique de la Direction des Etudes Nucléaires du CEA et membre élu du sénat académique de Paris Saclay, Jean Jacques Marigo est membre du conseil scientifique de l'Ecole Doctorale de l'Ecole Polytechnique.

L'attractivité internationale du laboratoire s'observe à plusieurs niveaux : 5 nationalités différentes parmi les chercheurs, 7 post-doctorants dont 5 nationalités différentes, un tiers des doctorants de nationalité étrangère (Allemagne, Suisse, Italie, Chine, Viêt-Nam, Liban, Iran, Cameroun, Biélorussie, Tunisie). De manière plus précise, les 31 doctorants actuels sont issus des grandes écoles ou universités françaises et étrangères (6 École Polytechnique ou Écoles Normales, 10 universités étrangères dont RWTH Aachen University, Technische Universität München, Bundeswehr University Munich, Politecnico Milan, Sapienza Rome, Tongji University).

Cette activité internationale se traduit par un programme de séminaires de prestige (J. Rice et J. Hutchinson de Harvard ; V. Tvergaard du DTH ; V. Deshpande, S. Guest et N. Fleck de Cambridge ; A. Gorieli de Oxford, R. James de Minnesota, ...) par des visites sabbatiques de longue durée de professeurs étrangers au LMS (parmi les plus récents, R. Elliott, University of Minnesota (2010), K. Ravi-Chandar, University of Texas Austin (2011-2012), M. Jabbour, University of Kentucky (2013), M. Grasselli Politecnico di Milano(2013)), et par des séjours sabbatiques de membres du LMS (L. Truskinovsky, Harvard (2010-2011), H. Maitournam, Caltech (2011-2012), par des masters ou doctorants avec un double diplôme d'universités européennes ou américaines. Le LMS a développé des collaborations de recherche avec de nouveaux partenaires internationaux (Japon, Chine, Suisse, UK, USA), citons en particulier un accord signé avec Nippon Steel, et deux accords récents signés avec les Universités de Caltech à Pasadena et de JiaTong à Shanghai. Patrick Le Tallec vient d'être nommé « LuoJia » Chair Professor à l'Université de Wuhan en Chine.

Cf. Annexe 6b : liste contrats

2.4. Interactions avec l'environnement social, économique et culturel

Le LMS a maintenu sa stratégie de développement des partenariats à long terme particulièrement avec des grands groupes industriels. Le LMS a en moyenne 30 à 35 contrats de collaboration actifs par an avec ses partenaires auxquels s'ajoutent une dizaine de contrats ANR (cf. liste contrats annexe 6). Ces partenariats représentent 60 % des crédits disponibles pour le laboratoire. Ce niveau d'activité est maintenu chaque année par la continuité de collaborations à long terme avec les industriels et le développement de nouveaux partenariats : PSA Peugeot Citroën, SAFRAN, TOTAL, le CEA, l'IFPEN, l'ANDRA, MICHELIN, SNCF, EDF, LAFARGE, BRGM, ARKEMA, STORENGY, GEOSERVICES (Groupe Schlumberger), Nippon Steel sont les principaux partenaires du LMS permettant au laboratoire d'être présent sur les 2 domaines d'application industrielle que sont le Transport et l'Énergie. La collaboration à long terme avec le groupe PSA Peugeot Citroën s'est considérablement renforcée avec la mise en place de la « Chaire André Citroën » et de l'« Openlab Computational Mechanics ».

À noter qu'un quart des doctorants sont en thèse « CIFRE » avec nos partenaires, avec notamment :

- Lafarge, EDF pour le pôle « problèmes multidisciplinaires »
- PSA, EDF, SNCF, SAFRAN (HERACKLES) pour le pôle « comportement et durabilité des structures »
- EDF, TOTAL, MICHELIN pour le pôle « comportement des matériaux et analyses multi-échelles »

D'autres contrats d'encadrement de thèse ont été signés hors processus CIFRE dont principalement avec PSA, le CEA et l'IFPEN. Les autres contrats concernent des travaux associés à des collaborations déjà en cours ou des études permettant d'initialiser de nouvelles collaborations (Nippon Steel, Géoservices...).

Le laboratoire collabore avec la Fédération Francilienne de Mécanique et il est à noter qu'un projet interdisciplinaire (LOB-LMS) vient de démarrer dans le cadre de l'action « mécanique du vivant ».

Labels

Cette activité partenariale a permis au laboratoire d'être labellisé dans le cadre de l'Institut Carnot des Mines depuis 2011.

Brevets

Les brevets déposés par des chercheurs du LMS portent sur le domaine du stockage (2 brevets), un procédé de détermination de la limite de fatigue d'un élément solide avec PSA, un dispositif d'amortissement en collaboration avec des membres du CEA et sur un dispositif d'analyse d'interaction moléculaire dans le cadre de l'opération mécanique du vivant en collaboration avec des membres du LOB (Laboratoire d'Optique et Biosciences), brevet qui fait l'objet d'un projet ASTRE pour la création d'un prototype avec la société HORIBA. (Cf. liste en annexe 6c).

Activité de Conseil scientifique

Plusieurs chercheurs du laboratoire sont conseillers scientifiques auprès de nos partenaires industriels, à noter :

- Consultant CEA- P. Le Tallec
- Consultant EDF- J.J. Marigo
- Consultant SNCF - H. Maitournam
- Consultant MECAMIX (société créatrice de méthodes et de logiciels innovants dans le domaine de la fatigue et de la simulation de procédés) - H. Maitournam
- Expert du comité scientifique de l'IFPEN et membre du comité éditorial d'Oil & Gas Science and Technology (revue de l'IFPEN) - P. Bérest
- Consultant DOW Chemical Company (USA), ITASCA (USA), CANATXX (GB) - P. Bérest
- Correspondant au réseau francilien de Géosciences de l'IFPEN - A. Dimanov

Associées à ces contrats de collaboration et ces activités de conseils scientifiques, de nombreuses implications des chercheurs du LMS à des comités, fondations, groupements de recherches contribuant à la transmission, aux échanges et au rayonnement scientifique du laboratoire, tels que :

- *Président du Groupe Permanent Déchets (GPD) de l'Autorité de Sûreté Nucléaire* - P. Bérest
- *Membre de la Commission d'évaluation de la gestion des déchets radioactifs CNE chargée de conseiller l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix scientifiques et technologiques (OPECST)* - P. Bérest
- *Membre du groupe de travail chargé de rédiger le guide « Lignes de conduite pour la sécurité d'un site de stockage géologique de CO2 en 2011* - P. Bérest
- *Président du Solution Mining Research Institute (2011)* - P. Bérest
- *Membre de la FEED (Fondation Européenne de l'Énergie de Demain)* - HD. Bui
- *Vice-Président de l'ISIMM, International Society for the Interaction of Mechanics and Mathematics* - L. Truskinovsky

- Membre du bureau de l'association CSMA (*Calcul des Structures et Modélisation*) - H. Maitournam et A. Constantinescu
- Membre du GDR *Physique de la cellule au tissu* et du GDR *MePhys (Mécanique et Physique et des Systèmes Complexes)* - J.M. Allain
- Membre de la SF2M et de *Mecatmat* et trésorier du *Comité National Français de la Mécanique* depuis 2010 - A. Constantinescu
- Animateur du thème « *Dynamique* » pour la *Fédération Francilienne de Mécanique* - matériaux, structures, procédés depuis 2007 - D. Mohr
- Membre de la section 9 du Comité national de la recherche scientifique - X. Boutillon (depuis 2012, membre du bureau) et J.J. Marigo (depuis 2013).
-

Et associés à des comités de rédaction ou éditions :

- Membre du Comité de rédaction du *JoMMS (Journal of Mechanic, Materials and Structures)* - HD Bui
- Rédacteur en chef *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, Springer, 2008-2010 et Editeur associé de *Journal of Elasticity* et de *Mechanics and Mathematics of Solids* L. Truskinovsky
- Éditeur *International Journal of Numerical Methods in Engineering* et Éditeur associé *Computer and Structures*- P. Le Tallec
- Editeur associé *International Journal of Impact Engineering* et membre du bureau éditorial de *Strain* - D. Mohr
- Editeur associé, *International Journal of Solids & structures* - N. Triantafyllidis
- Responsable éditorial des Editions de l'Ecole Polytechnique - X. Boutillon

À noter, en 2010, le rapport d'expertise rédigé par M. Salençon (membre du LMS) et M. Carpentier sur le changement climatique. Rapport à Madame la Ministre de l'Enseignement supérieur et la Recherche (26-10-2010).

Les membres du laboratoire participe également à des manifestations pour le rayonnement de la recherche qui s'ajoutent à l'organisation des séminaires scientifiques, avec notamment :

- Participation active à la semaine de la science réservée aux élèves de l'École Polytechnique, présentation du laboratoire, visites des salles expérimentales, démonstrations, rencontres avec des partenaires industriels du laboratoire
- Participation à la nuit des chercheurs, évènement annuel permettant au grand public l'accès et la découverte des laboratoires de recherche, accueil des visiteurs extérieurs au sein du laboratoire, organisation de visites, démonstrations de quelques expériences scientifiques...
- Accueil au LMS de lycéens dans le cadre de l'action apprentis-chercheurs de l'Arbre des Connaissances APSR pour les initier à la démarche scientifique, élabore un projet et réaliser des expériences sur la thématique scientifique du laboratoire. Accueil de 14 lycéens au sein du LMS sur les 4 dernières années. Les travaux sont présentés lors d'un congrès des apprentis-chercheurs en fin d'année.

Cf. *Annexe 6b : liste contrats* et *Annexe 6c : liste brevets*

3. Formation et formation par la recherche

3.1. Formation

3.1.1. L'encadrement doctoral

Le LMS est aujourd'hui rattaché à l'École Doctorale de l'École Polytechnique (EDX). Le laboratoire compte, au 1er juillet 2013, 13 personnes habilitées à diriger des recherches en activité. Il incite fortement les autres permanents, dont en particulier les jeunes chercheurs, à préparer une HDR ; quatre d'entre eux devraient la soutenir dans les mois qui viennent.

3.1.2. Le recrutement des doctorants

Le laboratoire forme environ une dizaine de doctorants par an (45 soutenances entre le 1/1/2008 et le 31/12/2012). Il a reçu une quarantaine de chercheurs dans le cadre de contrats post-doctoral durant la même période.

Le **recrutement** se fait par une participation active du LMS aux masters (Programmes d'Approfondissements de 3^{ème} année ou M2 cohabilités), par des accords internationaux ciblés sur des grandes universités internationales (Caltech, Jia Tong, Milan, ...), par le réseau personnel des chercheurs et la publication sur le site web du laboratoire et de l'EDX. A titre indicatif, les 31 doctorants **inscrits** en thèse fin 2012 étaient issus des grandes écoles ou universités françaises et étrangères (6 École Polytechnique ou Écoles Normales, 10 universités étrangères dont RWTH Aachen University, Technische Universität München, Bundeswehr University Munich, Politecnico Milan, Sapienza Rome, Tongji University, Polytechnic University Ho Chi Minh, USTH Hanoi, École Polytechnique de Yaoundé).

La **sélection** s'appuie sur le triple accord du directeur de thèse, du directeur du laboratoire (après avis du conseil de laboratoire) et du directeur de l'École doctorale.

Leur **financement** est assuré à parts égales par des bourses ministérielles (bourses Monge, allocations AMX, allocations EDX, allocations DRE ou ANR) (10 sur l'effectif 2012) ou programmes de coopération internationaux (4), et par des financements industriels (9 financements industriels et 8 CIFRE). Plus de la moitié des doctorants sont de nationalités étrangères et nous comptons 7 nationalités différentes en 2012 (Française, Italienne, Tunisienne, Vietnamiennne, Camerounaise, Allemande, Chinoise).

3.1.3. La politique de suivi des thèses

- Un référent et les représentants des doctorants au conseil de laboratoire sont chargés d'accueillir les doctorants dans le cadre de la **journée des nouveaux arrivants** puis de les orienter dans leur nouveau cadre de travail.
- En **fin de première année**, chaque doctorant fait un exposé sur le déroulement et l'état d'avancement de la thèse devant un comité restreint au(x) directeur(s) de thèse et à deux chercheurs extérieurs au sujet. Cet exposé donne lieu à un rapport qui conditionne la réinscription en deuxième année.
- En **fin de deuxième année** (et éventuellement en fin de troisième si une réinscription est nécessaire) chaque doctorant fait un exposé dans le cadre de la **journée des doctorants**. Cette journée a pour but de mettre les doctorants dans les conditions réelles d'un exposé de recherche (d'une trentaine de minutes) devant un large auditoire. Un rapport est fait à l'issue de cette journée, rapport qui conditionne la réinscription.
- Depuis 2012, le LMS organise le **Symposium Jean Mandel**, séminaire annuel parrainé par la Chaire André Citroën. Il se déroule au mois de Juin sur une journée complète et porte sur un des thèmes forts du laboratoire. Un invité d'honneur assure l'exposé introductif et la présidence de la journée qui consiste en une présentation des doctorants travaillant sur le thème choisi.

- Durant tout son doctorat, chaque doctorant est incité à suivre des formations de l'École doctorale (au minimum Journées d'accueil et Doctoriales), à suivre quelques cours scientifiques de niveau M2 ou doctoral (sur le campus ou à l'extérieur), à suivre le séminaire hebdomadaire du laboratoire, à préparer et à tenir à jour un poster de présentation de ses travaux, à exposer le résultat de ses travaux en interne et en externe, à participer et à présenter une communication à une conférence internationale, à soumettre au minimum un article scientifique pendant sa thèse, à séjourner plusieurs semaines dans une université étrangère collaborant avec le LMS ou avec le projet du doctorant.

3.1.4. Le devenir des doctorants

Le détail du devenir des doctorants qui ont soutenu dans la période 2008-2013 est donné en annexe 7. Une bonne majorité a rapidement obtenu un CDI dans une (en général, grande) entreprise. On peut noter que 4 des doctorants de cette période ont réussi à intégrer le corps des Chargés de Recherche du CNRS et 2 celui des Maîtres de conférence des Universités.

3.2. La participation à l'enseignement

3.2.1. Le personnel enseignant

L'ensemble du laboratoire est impliqué dans des activités d'enseignement et ce majoritairement au sein du département de mécanique de l'École. Le laboratoire comporte 2 professeurs, 1 professeur associé et 3 maîtres de conférences à temps complet, 1 professeur et 4 professeurs chargés de cours à temps incomplet. De plus, plusieurs chercheurs interviennent dans le cadre de vacances et, de façon récurrente, plusieurs doctorants font du tutorat ou du monitorat.

3.2.2. Les enseignements aux élèves-ingénieurs

Suivant la tradition de l'École, c'est un mécanicien des solides (P. Le Tallec, aujourd'hui) qui est chargé du cours structurant de Mécanique des Milieux Continus de 2^{ème} année, cours qui est suivi par 400 élèves environ. Toujours en 2^{ème} année, plusieurs enseignants sont impliqués dans les enseignements expérimentaux (modals).

Le laboratoire est impliqué dans les programmes d'approfondissement (l'équivalent des M1) de Mécanique, d'Innovation Technologique et d'Energies du 21^{ème} siècle. Ces implications incluent la responsabilité générale du PA, le suivi de projet de recherche, la responsabilité de Cours Magistraux ou de Petites Classes.

3.2.3. Les enseignements de Master

Une grande majorité des élèves effectuent leur 4^{ème} année à l'extérieur (soit dans une école d'application, soit dans une université étrangère) ce qui limite le flux potentiel de polytechniciens dans les masters locaux. On peut espérer que cette tendance s'infléchira grâce d'une part à la création de l'Université Paris Saclay et d'autre part à la réforme de la 4^{ème} année de l'École.

Avant la mise en place des masters de l'Université de Paris-Saclay pour lequel le laboratoire est un acteur majeur, le laboratoire organise ou intervient fortement dans les masters suivants :

- les parcours TACS (Techniques Avancées en Calcul des Structures) et MAGIS (Matériaux et Sciences de l'Ingénieur de Paris) de la spécialité MMS (Mécanique des Matériaux et des Structures) co-habilitée avec l'UPMC, l'ENS Cachan, l'ENSTA et l'ENSAM ;
- le parcours M4S (Modélisation Multiéchelle et Multiphysique des Matériaux et des Structures) de la spécialité Innovation Technologique portée par l'École Polytechnique en collaboration avec le CMAP (mathématiques appliquées) et le LPMC (physique de la matière condensée), ainsi qu'avec Caltech dans le cadre d'un accord de double diplôme.



Section des unités de recherche

Ce parcours, nouvellement créé, est à vocation fondamentale et pluridisciplinaire. Il fonctionne en partenariat avec deux autres laboratoires de l'École, le CMAP (mathématiques appliquées) et le LPMC (physique de la matière condensée), ainsi qu'avec Caltech dans le cadre d'un accord de double diplôme.

Cf. Annexe 7a : thèses soutenues et Annexe 7b : thèses en cours.

4. Stratégie et perspectives scientifiques pour le futur contrat

L'objectif général du laboratoire est de proposer, construire, analyser et valider des modèles thermodynamiquement consistants dans un cadre multiéchelle et multiphysique. Pour réaliser cet objectif, la première priorité est de pouvoir attirer et recruter des chercheurs, enseignants chercheurs et ingénieurs de recherche créatifs, entreprenants et à fort potentiel. Le laboratoire propose en parallèle d'organiser sa stratégie autour de deux axes principaux :

- un axe « méthodes », avec trois composantes (essais originaux, imagerie et mesures de champs, techniques d'identification et d'inversion de données).
- un axe par thématique avec cinq thèmes majeurs (interfaces et comportement des matériaux, endommagement et criticité, matériaux architecturés, matériaux et systèmes actifs, biologie et tissus biologiques)

4.1. Axe méthodes

4.1.1. Essais originaux

L'accompagnement expérimental des recherches sur les interfaces, sur les microarchitectures, sur les matériaux actifs ou biologiques exige le développement et la mise au point d'essais complexes à diverses échelles, avec plusieurs axes de chargement en simultané et une interaction temps réel avec l'analyse des déformations par imagerie.

En particulier, l'intérêt croissant du laboratoire pour les matériaux mous, tels que les tissus biologiques ou les élastomères actifs, nous amène désormais à développer des bancs d'essais adaptés aux très faibles charges, aux faibles dimensions des échantillons et éventuellement à leurs grandes déformations. Ces bancs d'essais couvriront les chargements uniaxiaux comme multiaxiaux en fonction des procédures d'identification spécifiques aux matériaux à caractériser, et seront instrumentés par des techniques d'imagerie haute résolution. D'autres cadres nécessitent aussi de développer des essais de grande sensibilité. En relation avec des études sur le stockage dans les cavités salines, des essais *in-situ* de suivi pendant plusieurs années de la pression de la saumure contenue dans une cavité fermée ont été conduits; des vitesses de fermeture par fluage de l'ordre de 10^{-12} s^{-1} ont ainsi été mesurées. Des essais sur éprouvettes dans des bâtis de fluage placés dans des galeries souterraines dont la température est très stable sont venus compléter les mesures précédentes et ont mis en évidence des vitesses de déformation analogues. Tous ces dispositifs doivent rester en évolution constante afin de gagner encore en résolution.

En parallèle, il est nécessaire de fortement développer les essais en environnement multi-physique (température, humidité, pression de confinement, champ magnétique, bain liquide). Nous développerons donc également des essais sous de nouveaux environnements. En particulier, l'intégration de bancs d'essais dédiés aux matériaux mous à l'électroaimant 3 Tesla permettra d'étudier les couplages magnéto-mécaniques dans les élastomères magnéto-rhéologiques. Des essais spécifiques sont également en cours d'étude au laboratoire pour quantifier le couplage entre déformation mécanique et efficacité de couches minces photovoltaïques.

4.1.2. Imagerie et mesures de champs

Depuis les années 90, le LMS s'est spécialisé dans les mesures cinématiques à l'échelle de la microstructure par la méthode de la corrélation d'images numériques. Cependant ces mesures restent, jusqu'à présent, surfaciques et en 2 dimensions avec un accès aux seules composantes UX et UY du vecteur déplacement. Ces cinq dernières années ont été réalisés des efforts sur deux sujets concernant la méthode de l'imagerie et la mesure de champs :

- une mesure plus précise du glissement aux interfaces notamment pour une meilleure caractérisation des déplacements aux joints des grains de matériaux polycristallins
- une automatisation de la recherche de distance de focalisation en optique pour permettre une prise d'images automatiques lors d'essais long, notamment de fluage ou d'hydratation.

L'évolution des thématiques de recherche du LMS pour les 5 prochaines années met en avant un besoin de mesure de la 3ème composante manquante du vecteur déplacement, i.e. le déplacement hors plan. Cette mesure se montrera notamment nécessaire pour les thématiques portant sur le comportement et la microstructure des polycristallins ainsi que les matériaux architecturés et couches minces. Pour cela, deux voies parallèles et complémentaires sont envisagées :

- La mesure de déplacement hors plan par la méthode de variation focale en optique. Cet outil a déjà commencé à être développé et permettra de mesurer la 3ème composante du vecteur déplacement lors d'essais in-situ de longue durée sous optique
- La mesure par stéréocorrélation, déjà mise en place pour des essais sous optique, pourra être mise en place pour des essais sous microscopie électronique à balayage.

En complément de ces deux développements, des mesures de contraintes locales pourront être développées. L'idée ici, serait d'utiliser une méthode complémentaire aux mesures réalisées par l'utilisation de l'EBSD, de diffraction de Rayons X, ... développées dans d'autres laboratoires français. L'utilisation des champs de déformations surfaciques locaux autour d'un trou que l'on réaliserait de manière incrémentale (méthode du trou incrémental à l'échelle fine) pourra être mise en place grâce à l'acquisition du Microscope Electronique à Balayage couplé à un faisceau d'ions focalisé (MEB-FIB du projet Equipex MATMECA) et de la compétence du LMS en mesure de déformations locales. Une identification des contraintes internes pourra ensuite être réalisée par méthodes inverses.

Le dernier aspect concerne le développement de méthodes robustes permettant de diminuer la base de mesure des déformations locales mesurées. La lithographie électronique actuelle permet de réaliser des marquages pour la corrélation d'images numériques de l'ordre du micromètre, permettant ainsi d'atteindre des bases de mesure minimales de 1 à 2 micromètres. Des bases de mesures plus petites nécessitent des marquages plus fins, à l'aide notamment de nanoparticules. Il faut maintenant étudier et développer ces nouveaux marquages pour pouvoir les utiliser dans des situations à plus faible échelle de mesure des déformations intragranulaires pour des matériaux à grains très fins (de taille inférieure à 1 micromètre) ou des déformations de matériaux amorphes tels que les verres métalliques.

4.1.3. Techniques d'inversion de données

L'identification du comportement mécanique des matériaux et des structures a été un thème traditionnel du LMS. L'objectif est maintenant développer les méthodes permettant d'utiliser au mieux le développement récent des techniques de mesure de champ et de corrélation d'image qui fournissent des données abondantes et de qualité. Ceci a été abordé récemment pour des applications au comportement des polymères en grandes déformations (Thèse D.Jalocha, encadrement A.Constantinescu), des matériaux biologiques (Thèse B.Lynch, encadrement JM Allain ou thèse P. Moireau encadrement P. Le Tallec et D. Chapelle), ou pour l'analyse des essais dynamiques (D.Mohr). L'arrivée récente sur le campus de l'équipe INRIA/DIGITEO M3DISIM Mathematical and Mechanical Modeling with Data Interaction in Simulations for Medicine ouvre la voie en 2013 à une collaboration ayant comme objectif le couplage des méthodes variationnelles (calcul de gradient, sensibilité, ...) développés au LMS (P. Le Tallec, A.Constantinescu) avec les méthodes fondées sur le filtre de Kalman développés au M3DISIM. Cette collaboration devrait donner lieu à la création d'un projet commun et va aussi permettre un rapprochement des activités des deux structures dans le domaine de la biomécanique.

4.2. Axes thématiques

4.2.1. Analyse et modélisation du rôle des interfaces dans le comportement des matériaux

Les matériaux polycristallins ou finement divisés présentent des similitudes en termes i) de mécanismes de déformation plastique en volume (par mobilité de défauts linéaires et ponctuels), ii) d'échelles pertinentes de modélisation en relation avec la microstructure, iii) d'influence des interfaces sur la réponse macroscopique. Toutefois la diversité structurale des interfaces (présence de micro/nano porosité, de phases amorphes ou fluides, cohérence ou au contraire présence de dislocations intrinsèques/unités structurales, ségrégation d'impuretés...) entraîne des différences notables en termes de mécanismes élémentaires, donc de réponse mécanique de l'interface. Les joints de grains jouent un rôle primordial quant à l'hétérogénéité et l'anisotropie de la déformation plastique du polycristal : accommodation des incompatibilités de déformation entre grains adjacents par des réponses locales

complexes combinant glissement/maclage multiple et suscitant donc localement un fort écrouissage, glissement aux joints, voire décohésion et endommagement intergranulaire.

Aux hautes températures, ou pour les matériaux à grains ultra-fins ($<1\mu\text{m}$) ou nano structurés ($< 100 \text{ nm}$) pour lesquels i) la proportion des interfaces par rapport au volume est élevée et ii) la plasticité dans les grains devient difficile du fait de leur taille, le glissement aux joints de grains, assuré par transfert diffusif de matière et/ou micro plasticité au voisinage du joint devient un mécanisme prépondérant de déformation. C'est également le cas pour des matériaux finement divisés tels que les argiles, dans lesquels les interfaces sont hautement réactives vis-à-vis de l'environnement chimique et entraînent le gonflement ou le retrait, selon l'humidité relative et les échanges cationiques avec le milieu environnant.

Ainsi, il nous apparaît primordial d'accentuer l'effort d'étude et de modélisation des structures et des réponses mécaniques des interfaces i) par des approches expérimentales aux échelles micrométrique et inférieures, prenant en compte l'aspect tridimensionnel du problème (mesures AFM des composantes hors plan du glissement aux joints et des composantes dans le plan par corrélation d'images, grâce à des marquages de surface spécifiques près des joints, mesure de l'inclinaison des joints et des désorientations entre grains par des coupes sériées au FIB...), ii) par la modélisation du glissement aux joints (à base physique, en décrivant la transmission, l'absorption et l'émission de dislocations par les joints ou de type phénoménologique avec des éléments cohésifs...) et iii) sa prise en compte dans le calcul par éléments finis du comportement des polycristaux.

Les efforts visent différentes classes de matériaux comme les métaux à structure hexagonale compacte, dont les cristaux ont une réponse fortement anisotrope sollicitant beaucoup les joints pour leur accommodation, mais aussi les céramiques (SiC, SiN), oxydes simples (MgO, ZrO₂, silicates), cristaux ioniques (NaCl, MgO) et matériaux finement divisés (phyllosilicates et argiles), présentant des applications dans les transports ou l'industrie chimique, mais aussi pour le stockage d'énergie (hydrocarbures, air comprimé) ou de déchets nucléaires en sites géologiques

4.2.2. Endommagement et criticalité

Alors que la rupture fragile a un caractère intrinsèquement stochastique, lié à l'hétérogénéité des microstructures, la plupart des modèles continus d'endommagement des matériaux quasi fragiles sont déterministes, avec un « seuil d'endommagement » et une contrainte ou une déformation « critiques » à valeur unique, dont la relation avec les distributions mesurées de contrainte à rupture n'est pas claire. De tels modèles sont insuffisants dans le cadre d'une approche fiabiliste de la conception des structures. Diverses stratégies peuvent être envisagées pour rendre compte de la variabilité intrinsèque de la rupture quasi-fragile : introduire, en guise de seuil et de valeur « critique » des distributions aléatoires ou un champ d'endommagement ou, de façon équivalente, de rigidité initiale, ou encore une distribution initiale de défauts (par le biais de zones cohésives, par exemple). Dans tous les cas, il faut pouvoir déterminer expérimentalement ces champs ou ces distributions et en relier les paramètres à la microstructure, dans une optique éventuelle d'optimisation de celle-ci. La localisation précoce de l'endommagement qui résulte de l'hétérogénéité microstructurale rend en outre plus impérieux le besoin de régularisation, à l'aide de modèles non-locaux. La coexistence de plusieurs longueurs internes (paramètre de non-localité et distance d'auto-corrélation des champs) pose, enfin, la question des relations entre ces grandeurs. Toutes ces questions feront l'objet, dans les prochaines années, d'un effort de recherche combinant caractérisation microstructurale, essais thermomécaniques variés, observations de l'endommagement, modélisation et simulation numérique.

Par ailleurs, de multiples structures (céramiques pour les prothèses, blocs de déchets nucléaires vitrifiés, roches des ouvrages souterrains...) se dégradent lentement par multi-fissuration en corrosion sous contrainte. La multiplicité des fissures et la complexité de leur géométrie 3D interdisant l'usage de la Mécanique de la Rupture pour en prévoir l'évolution, l'approche la plus raisonnable est de recourir à la Mécanique Continue de l'Endommagement. Toutefois, très peu de modèles de ce type ont été développés pour traiter d'endommagement lent sous chargement constant et en relation avec un environnement corrosif. Il y a donc là matière à des recherches originales, qui pourraient en outre chercher à prendre en compte les phénomènes de « cicatrisation » qui sont observés, notamment dans les verres, en environnement humide ou à haute température.

Les critères de fatigue existants (identifiés presque exclusivement à partir d'essais de traction et torsion combinées) sont inadaptés à des sollicitations cycliques de tension biaxiale, pourtant courantes dans les réservoirs sous pression, les pièces tournantes, ou encore en fatigue thermique. Une des difficultés dans la formulation des critères est d'éviter de confondre les effets de contrainte moyenne et les effets de la biaxialité, complexes et contrastés, selon que l'on considère plutôt la phase d'amorçage, prépondérante dans le domaine de l'endurance, ou

d'érouissage cyclique et de fissuration, essentielles en fatigue oligocyclique. Doté d'une machine de fatigue triaxiale, d'une grande expérience dans la conduite des essais multiaxiaux, notamment en traction + pression interne ainsi que des moyens et du savoir-faire pour l'analyse à échelle fine des mécanismes d'endommagement, le LMS est bien placé pour aborder cette problématique un peu délaissée et la compléter par l'étude des effets d'une tension biaxiale en fatigue-corrosion, effet qui pourrait s'avérer aggravant, compte-tenu de l'accélération des phénomènes de diffusion d'hydrogène dans les métaux, lorsque le taux de triaxialité des contraintes augmente.

De manière plus globale, l'objectif est aussi de comprendre pourquoi la criticité se produit dans des systèmes mécaniques non linéaires (matériau ou structures). Plus précisément, nous visons le développement de méthodes fiables de prévision et de contrôle sur la base des statistiques observées des fluctuations dans la plasticité et transitions de phase martensitique. En effet, la criticité, ainsi que la stabilité marginale ou l'universalité des lois de puissance sont des questions d'une grande importance dans la science contemporaine. Un trait caractéristique des systèmes critiques est la stabilité minimale ou marginale. Sur le plan mécanique, cela signifie que le système est non-linéarisable et correspond à un point de bifurcation. Si une telle dégénérescence a été évitée dans le passé en ingénierie, elle devient maintenant un outil de conception, car elle apporte une amplification anormale associée à une adaptation rapide. Les systèmes critiques sont également connus pour leur robustesse remarquable face à des perturbations aléatoires indépendantes d'échelle. Les fluctuations dans les systèmes critiques sont fortement corrélées et portent des informations importantes sur la «santé» du système.

4.2.3. Matériaux architecturés

On appelle matériaux architectures des solides à microstructure périodique dont la taille de la cellule unitaire peut aller du nano au centimètre, suivant les applications. Le choix de la géométrie de leur cellule unitaire peut conduire à des propriétés macroscopiques remarquables. La recherche en ce domaine est en plein épanouissement, suite à l'application des techniques de fabrication des semi-conducteurs pour créer des matériaux ultralégers ou encore de l'utilisation des imprimantes 3D qui permettent la réalisation des micro géométries complexes. La recherche future du LMS dans cette direction est motivée par des applications dans les transports et l'énergie et porte sur les composites cellulaires et matériaux sandwich métalliques.

Composites cellulaires

L'objectif ici est de concevoir la géométrie de ces matériaux périodiques afin d'optimiser leurs charges critiques, i.e. de flambage. Il s'avère que la ruine de ces matériaux est due à un mécanisme local de flambage qui ensuite conduit à la ruine par localisation macroscopique de déformation. L'orientation des contraintes macroscopiques a une très grande influence sur les charges critiques ainsi que la colle qui est nécessaire à la fabrication de ces composites dont les propriétés changent avec la température. Des études basées sur la cellule unitaire et la représentation du monde par ondes de Bloch sont nécessaires pour établir le début d'instabilité et l'extension du mode critique correspondant. L'étude du mécanisme de ruine par localisation nécessite des analyses beaucoup plus poussées des solutions post-bifurquées qui font appel à la théorie des groupes de symétrie.

Matériaux sandwichs métalliques

Il s'agit ici de développer et caractériser le comportement mécanique des matériaux sandwichs avec des couches cœurs composées de tôles gaufrées. Il permet de mettre en avant les méthodes et modèles pour prédire la rupture ductile pendant la fabrication de ces matériaux développés au LMS. Les questions scientifiques liées aux matériaux sandwichs sont la modélisation de la distorsion de la surface seuil (« distortional hardening ») à cause de l'évolution plastique de la méso-structure de la couche cœur. En même temps, on s'intéresse aux propriétés mécaniques effectives de ces matériaux y compris leur rigidité en flexion, leur résistance à la perforation et leur comportement sous sollicitations dynamiques. Dans le futur on envisage également une extension de ces travaux à d'autres systèmes multicouches à des échelles fines comme l'assemblage des batteries. Ces assemblages sans interface (source de singularités et de délaminage) mais avec un gradient de composition permettant de passer progressivement d'un massif purement métallique à un revêtement céramique ou polymère ont fait l'objet de nombreuses recherches, compte tenu de leur potentiel contre les phénomènes d'usure, de corrosion sous contrainte ou d'oxydation. Les problèmes qui restent ouverts sont toutefois nombreux : détermination expérimentale des gradients de propriétés thermo-élasto-plastiques, résistance à la fissuration par fatigue, évaluation et prise en compte des contraintes résiduelles, notamment. Les compétences du LMS en matière d'expérimentation et simulation numérique couplées pourront être utilement mobilisées sur cette problématique. Des essais de flexion sous MEB accompagnés de mesures des champs par corrélation d'image et complétés par des essais de nano-indentation

instrumentés, devraient permettre d'identifier ces gradients de propriétés et de contraintes résiduelles, ou encore d'extraire les facteurs d'intensité de contrainte et les termes d'ordre supérieur ainsi que d'évaluer les effets de fermeture en fissuration par fatigue.

La disponibilité au LMS de presses hydrauliques de forte capacité permet enfin d'envisager la fabrication par déformation plastique sévère (extrusion en filière coudée) d'alliages métalliques (titane, aciers, alliages de cuivre ou d'aluminium) à grains ultra-fins (100-500 nm), matériaux très prometteurs en termes de résistance mécanique, sous une forme assez massive pour permettre des essais mécaniques classiques. Un des verrous à lever pour le développement de ces matériaux est leur instabilité microstructurale (croissance des grains) à la température ambiante, sous l'effet d'un chargement mécanique dynamique ou cyclique, la modélisation du glissement et de la migration de leurs joints de grains (thème qui rejoint l'axe thématique n°1) et la compréhension de leur comportement en fatigue, affecté par une transition des mécanismes d'endommagement selon l'amplitude du chargement. On s'attachera également à étudier leur résistance en fatigue multiaxiale, en relation avec l'anisotropie microstructurale plus ou moins forte qui résulte des déformations plastiques sévères nécessaires à leur obtention.

4.2.4. Matériaux actifs

Ce thème concerne sur la fabrication, l'identification expérimentale et la modélisation des matériaux actifs, i.e. des matériaux qui présentent des couplages entre leurs sollicitations mécaniques et électromagnétiques. Un vaste domaine d'applications se construit dans cette direction de recherche, car ces matériaux sont utilisés comme capteurs ou actionneurs ou dans les énergies renouvelables. L'idée principale ici sera d'utiliser la géométrie et des propriétés de matériaux à différentes échelles pour avoir des propriétés effectives cibles ou améliorées à l'échelle macroscopique. Pour cela, des géométries complexes (microstructures en forme de colonnes des particules de fer doux) ou plus simples (couches minces) peuvent être considérées. Plus précisément, ce thème se décline en trois directions :

Microstructures des matériaux MRE pour optimiser la magnétostriction

Dans le cadre des applications en haptique, il est très important de fabriquer des matériaux qui optimisent le couplage entre propriétés mécaniques et électromagnétiques, afin de maximiser la magnétostriction avec le minimum de champ magnétique. En soumettant le mélange polymère/particules de fer doux à un champ électrique pendant la solidification on aboutit à des structures microscopiques en forme de chaînes de particules, qui suivant l'intensité du champ magnétique, ont des propriétés macroscopiques très intéressantes (allant jusqu'au changement de signe de magnétostriction). La recherche déjà esquissée au LMS aura une composante de fabrication de matériaux MRE en exploitant les propriétés du polymère et le champ magnétique de solidification. En parallèle, une activité théorique développera en collaboration avec l'Université de l'Illinois des outils nécessaires pour l'homogénéisation de ces microstructures et pour la simulation numérique des problèmes couplés qui en résultent.

Couches minces en magnéto-mécanique

Il s'agit ici de l'utilisation en mode actif des instabilités des couches minces des élastomères magnétorhéologiques sous chargement magnéto-mécanique afin de contrôler la rugosité des surfaces en fonction de différentes applications. On se propose d'étudier le comportement d'un assemblage fait d'un substrat mou isotrope et d'une couche mince MR isotrope transverse lorsqu'il est soumis à des chargements magnétique et mécanique combinés. On s'intéressera en particulier à l'apparition de l'instabilité conduisant au flambage local de cet assemblage et on étudiera la contribution relative des chargements magnétique et mécanique à l'apparition de l'instabilité. Finalement, les instabilités induites par la combinaison des chargements magnéto-mécaniques seront optimisées en utilisant différentes microstructures (avec des particules en chaînes en différentes directions ou des tiges) afin d'avoir la rugosité de surface souhaitée.

Couches minces en semi-conducteurs

Cette direction se situe à l'interface entre la mécanique des solides, la physique de la matière condensée, et la thermodynamique des phénomènes hors équilibre. Elle vise à une meilleure compréhension du couplage entre mécanique et physique des semi-conducteurs, tel qu'il se manifeste dans les technologies de l'électronique (transistors à couche mince, diodes et de l'énergie solaire). D'une part, il est important de poursuivre la modélisation des instabilités de surface qui apparaissent en cours de croissance de couches minces et de nanofils : les instabilités de croissance à très petites échelles conduisent à une augmentation significative de la rugosité macroscopique des

surfaces planes par le biais de la formation de structures pyramidales, ainsi qu'à l'apparition d'oscillations collectives et la mise en paquets des marches atomiques des surfaces dites vicinales. Par conséquent, si elles sont contrôlées, ces instabilités peuvent être supprimées là où leur présence est préjudiciable. Au contraire, elles pourraient constituer un formidable outil de structuration des surfaces et des interfaces à des échelles de l'ordre du nanomètre là où les applications technologiques le requièrent. Un autre aspect important concerne l'étude de la démixion qui accompagne la cristallisation de couches minces de semi-conducteurs organiques. Le contrôle de la microstructure lors du dépôt de couches minces de semi-conducteurs organiques permettrait d'augmenter l'efficacité de conversion énergétique des cellules solaires et la mobilité des transistors dont font partie les couches minces en question.

4.2.5. Biologie et tissus biologiques

La biomécanique des tissus devrait se développer dans les prochaines années autour de quatre grands axes. D'abord, un axe expérimental, avec la nécessité de mettre au point des essais mécaniques plus complexes que ceux disponibles actuellement. En particulier, nous voulons mettre au point des essais bi-axiaux pour la peau de souris - avec des problèmes à la fois de découpe et de fixation de l'échantillon à la machine, mais aussi de conception d'une machine suffisamment compacte pour être insérée dans les moyens d'imagerie utilisés. De plus, il sera nécessaire de savoir travailler sur des petits échantillons : tendon, cornée, os... qui font quelques millimètres de côté au mieux.

Un deuxième axe est l'amélioration des techniques d'analyse. En effet, les images obtenues en biologie sont complexes - réseaux de fibres, billes ou cellules - en 3D et avec des intensités hétérogènes dans l'espace et le temps. Les méthodes de corrélation d'image usuelles ne fonctionnant pas bien dans ces cas, nous projetons de nouveaux développements - en particulier pour l'analyse de mouvements de fibres - en collaboration avec des laboratoires de mathématiques appliqués travaillant déjà sur ces questions.

Un troisième axe est l'identification de lois de comportement. Les moyens expérimentaux donnent accès à une large gamme de données multi-échelles sur différents tissus qui ne sont pas exploitées par les lois de comportement issues de la littérature. Nous voudrions donc développer de nouveaux modèles, multi-échelles, allant de la fibrille (au moins) jusqu'au tissu. Nous allons être aidés pour cela par notre rapprochement avec l'équipe INRIA de Dominique Chapelle (qui est déjà dans l'Opération Mécanique & Systèmes Vivants).

Le quatrième axe concerne la modélisation en biologie

Les travaux sur les tissus permettent de relier les sollicitations mécaniques macroscopiques aux mouvements locaux autour des tissus. Un autre aspect qui sera alors développé est la modélisation de la réponse de systèmes biologiques à des sollicitations mécaniques. Nous allons poursuivre le développement de modèles microscopiques, qui permettent de prédire la réponse d'ensembles de protéines lors d'un chargement mécanique, avec un intérêt particulier pour les chargements non constants et l'effet de la fréquence, qui a été peu exploré. Ce type de modèle peut alimenter d'autres modèles en développement à l'échelle supérieure, autour de la question de la rhéologie et de la motricité cellulaire. Nous voulons développer des modèles de croissance, et en particulier de croissance de plantes. L'intérêt des plantes est l'abondance de données sur la modification de la croissance par les sollicitations mécaniques, ainsi que l'intérêt des biologistes du végétal pour des modèles quantitatifs.

Dans cette étude des systèmes biologiques, la criticalité peut ouvrir de nouvelles perspectives. La criticalité a été mise en évidence dans de nombreux systèmes biologiques, allant des protéines individuelles aux populations. Par exemple, on a trouvé que le temps de relaxation dans un cytosquelette est distribué suivant une loi puissance. La criticalité se retrouve aussi dans des anomalies de super diffusion traduisant des corrélations profondes. Le cytosquelette présente une large distribution de tailles d'agrégats, et la criticalité peut autoriser les cellules à constamment changer de forme et de réponse mécanique. Elle facilite des tâches aussi complexes que diverses telles que division de cellules ou motilité de cellule en permettant un passage de comportement solide à un comportement fluide. Les systèmes biologiques actifs ont un apport d'énergie continu de l'intérieur. On y retrouve des nombreuses similarités avec les systèmes passifs contrôlés de l'extérieur présentant des aspects de criticalité tels que plasticité et turbulence avec la présence de micro-configurations fluctuantes et corrélées. Un objectif global de cette modélisation est de comprendre dans quel sens un système biologique peut être optimal. Pour un cytosquelette, il s'agira de comprendre le mécanisme de transformation impliqué dans son évolution vers des régimes de stabilité marginale.

Annexes (Fichier AERES_ANNEXES_LMS_OCT2013.PDF)

Annexe 1 : Présentation synthétique

Annexe 3 : Équipements lourds

Annexe 4 : Organigramme fonctionnel

Annexe 5 : Règlement intérieur et annexe sécurité

Annexe 6 : Réalisations

- annexe 6a : production scientifique
- annexe 6b : contrats industriels, contrats sur financement privé et contrats institutionnels
- annexe 6c : brevets en cours

Annexe 7 : Liste des thèses

- annexe 7a : thèses soutenues
- annexe 7b : thèses en cours

Annexe 8 : Document unique d'évaluation des risques - DUER

Annexe 9 : Liste des personnels.

Liste des personnels (chercheurs, enseignants-chercheurs et assimilés) de l'unité présents au 30 juin 2013 et qui le seront toujours au 1^{er} janvier 2015.