



Département d'évaluation
de la recherche

Unité de recherche
LMS UMR 7649
Dossier d'autoévaluation

CAMPAGNE D'EVALUATION 2018-2019
VAGUE E

INFORMATIONS GENERALES

Nom de l'unité : Laboratoire de Mécanique des Solides

Acronyme : LMS

Domaine et sous-domaine dans la nomenclature du Hcéres :

Domaine : Sciences et Technologies

Sous-domaine principal : ST5 Sciences pour l'ingénieur - SPI

Sous-domaine secondaire : SVE5 Physiologie, physiopathologie, cardiologie, pharmacologie, endocrinologie, cancer, technologies médicales

Directeur.rice pour le contrat en cours : Patrick Le Tallec

Directeur.rice (ou du porteur de projet) pour le contrat à venir : Andréi Constantinescu

Type de demande :

Renouvellement à l'identique

Restructuration

Création ex *nihilo*

Établissements et organismes de rattachement :

Liste des établissements et organismes tutelles de l'unité de recherche **pour le contrat en cours** et **pour le prochain contrat** (tutelles).

Contrat en cours :

- Ecole Polytechnique

- CNRS

- Ecole des Mines

| Prochain contrat :

| - Ecole Polytechnique

| - CNRS

| - Ecole des Mines

Choix de l'évaluation interdisciplinaire de l'unité de recherche (ou d'une ou plusieurs équipes internes) :

Oui

Non

DOSSIER D'AUTOÉVALUATION

1- Présentation de l'unité

1-1 Introduction

Le LMS est un UMR (Unité Mixte de Recherche) sous tutelle de l'École Polytechnique, du CNRS et de l'École des Mines. Le laboratoire rassemble un peu plus de 80 personnes. Son domaine de recherche porte sur la Mécanique des Milieux Continus, étudiée à des échelles multiples du triple point de vue théorique, expérimental et numérique. Le laboratoire se structure autour de trois pôles de compétence et d'un projet partagé avec l'INRIA. Un pôle de compétence correspond à un domaine d'activité, et rassemble les contributions de plusieurs chercheurs. Ce n'est pas une structure administrative, chaque chercheur contribuant à plusieurs pôles.

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, à leur fabrication et à l'étude de leur comportement notamment en liaison avec leur procédé de fabrication et leur microstructure. Cette activité est en lien avec des applications industrielles (notamment via des collaborations dans les domaines du transport et de l'énergie). Dans ce cadre, des sujets tels que la fabrication additive, la fatigue et l'usure, l'analyse dynamique et la stabilité des structures, l'identification et le contrôle de comportements, sont particulièrement d'actualité.

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

Enfin, les recherches menées dans le cadre de l'équipe M3DISIM, projet commun créé récemment entre l'INRIA et le LMS, visent à proposer de nouvelles méthodes mathématiques et numériques dans le domaine de la modélisation biomécanique des tissus et des organes, avec un accent non exclusif sur le système cardiovasculaire. Ces recherches incluent : (1) la modélisation des composants en soi; (2) des méthodologies de problèmes inverses, afin de bénéficier des différentes données disponibles pour compenser les nombreuses incertitudes inhérentes à ces systèmes naturels; (3) des procédures numériques spécifiquement formulées - et analysées - pour être efficaces pour les types de problèmes directs et inverses considérés; et (4) des études expérimentales et des applications cliniques, menées au sein de l'équipe et à travers diverses collaborations, en relation avec les objectifs de modélisation ci-dessus. C'est par construction une entreprise pluridisciplinaire, à la croisée des mathématiques appliquées, de la mécanique, de la bio-ingénierie et des applications médicales.

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

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 de grands industriels (TOTAL, EDF, PSA, SNCF, Michelin, SAFRAN, Schlumberger, Arkema), avec des organismes de recherche tournés vers les secteurs de l'énergie (CEA, IFP, Andra), et par sa participation à l'action mécanique du vivant du département de Mécanique. Les ressources propres annuelles du laboratoire sont de plus de deux millions d'euros, faisant l'objet en permanence d'une cinquantaine de contrats actifs.

Organigramme fonctionnel en annexe 3

1-2 Tableau des effectifs et moyens de l'unité

Ils sont donnés dans les fichiers Excel joints au dossier et résumés dans les bilans social et financier 2017 du laboratoire donnés en *Annexe 5*.

Au niveau du personnel, le laboratoire a vu ses effectifs de recherche évoluer de manière favorable sur ces 5 dernières années puisqu'après bilan de l'ensemble des mouvements entre 2013 et 2018, nous comptons 1 chercheur et 2 enseignant-chercheurs en plus dans nos effectifs (1 MC arrivant en fin d'année 2018). Ceci sans compter l'augmentation des effectifs due à l'intégration des 4 chercheurs INRIA de l'équipe M3DISIM. Soulignons enfin la forte présence des doctorants (une trentaine en moyenne) et le caractère international du laboratoire avec 15 nationalités présentes.

Le prochain contrat verra le départ de 2 professeurs et d'un Directeur de Recherche, dont le directeur d'unité actuel. Le processus de recrutement pour leur remplacement est déjà engagé.

En termes d'Ingénieurs-Techniciens, la situation évolue d'une manière moins favorable car ces 5 dernières années ont vu le départ successif de 6 IT et les remplacements n'ont pu s'opérer au même rythme. C'est pourquoi le l'effectif d'IT de l'unité a diminué de 3 personnes sur la période.

La situation est donc particulièrement critique à ce jour au regard des évolutions de compétences attendues et des moyens expérimentaux en fort développement.

En termes financiers, le LMS a vu ses ressources propres en constante augmentation, surtout depuis les 3 dernières années de la période avec le maintien d'une forte activité partenariale (contrats Cifre principalement) et la mise en place de grands projets tels que PLATINE, l'ERC MAGNETO, le projet DGA/Centre de fabrication additive et le renouvellement de la CHAIRE André Citroën. Le laboratoire gère ainsi plus de deux millions d'euros de budget annuel.

1-3 Politique scientifique

En termes de stratégie, l'objectif général du laboratoire est de proposer, construire, analyser et valider expérimentalement et numériquement des modèles thermodynamiquement consistants permettant de répondre à de grands enjeux scientifiques et techniques. En particulier, le laboratoire se veut un acteur majeur en conception, fabrication, calcul et analyse de fiabilité des milieux et matériaux hétérogènes micro ou nanostructurés, des couches minces et nano-objets, ou des tissus biologiques. Il s'agit d'étudier et de comprendre à différentes échelles les aspects de fabrication et de comportement mécanique à long terme de ces objets, aspects qui sont de plus en plus fortement liés.

Pour réaliser cet objectif, la première priorité est de pouvoir attirer et recruter au niveau international des chercheurs, enseignants chercheurs et ingénieurs de recherche, postdoctorants et doctorants créatifs, entreprenants et à fort potentiel. Le laboratoire est plongé dans un environnement très dynamique avec sa montée en puissance internationale et le développement du plateau de Saclay. Il a aussi une intense activité de formation doctorale commençant dès la première année de master.

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, le plus souvent in situ avec plusieurs axes de chargement en simultané et une interaction temps réel avec l'analyse des déformations par imagerie à des échelles de plus en plus fine. Dans un parc expérimental qui se développe par une action propre et en coopération, le laboratoire participe avec ses partenaires de Paris Saclay à la plateforme de caractérisation micromécanique in-situ mise en place dans le cadre de l'équipex Matmecca. Ce projet vient en complément de la mise en place des essais de nano objets sous environnement dans le cadre de la plateforme PLATINE construite et opérée en commun avec le LPICM et l'IFSSTAR.

L'autre action prioritaire en termes d'équipement concerne les techniques de fabrication additive. Il est en effet nécessaire de pouvoir imaginer, développer et fabriquer ses propres échantillons de matériaux et microstructures. Le laboratoire s'est équipé d'une imprimante polymères multimatériaux pour l'étude et la fabrication de matériaux microarchitecturés souples et actifs dans le cadre de l'ERC MAGNETO. Par ailleurs, il a procédé début 2016 à l'achat d'une imprimante 3D métallique en commun avec l'ENSTA, dans le cadre d'un projet soutenu par la DGA. Il participe enfin à l'initiative Fabrication Additive du Plateau de Saclay sur l'étude des procédés de fabrication métallique à lit de poudre et commence à investir sur les techniques de photolithographie.

Le laboratoire veut enfin rester présent sur les aspects de stockage dans les géomatériaux avec en particulier l'étude du comportement à long terme et faible charge des géomatériaux concernés.

1-4 Retour sur l'évaluation précédente

L'évaluation précédente avait indiqué quatre points de vigilance : l'implication du laboratoire dans les instances nationales et internationales, le maintien d'une politique de recrutement actif, l'incitation au dépôt d'habilitation à diriger les recherches pour ses chercheurs et la mise en place d'un comité de pilotage des installations expérimentales.

Implication du laboratoire dans les instances académiques et d'évaluation

L'implication des membres du laboratoire dans les instances académiques et d'évaluation de la recherche est importante :

- 2 membres du Comité National, section 9 (X. Bouffillon, 2012-2016, également membre de son bureau et J.J. Marigo), 2 membres du Comité National CNRS, section 9 depuis 2016 (J. Diani, N.Triantafyllidis, membre de son bureau),
- 1 membre chargé de mission à l'INSIS (A. Constantinescu, 2011-2015), 1 membre du conseil scientifique INSIS (V. Doquet, 2011-2014, également membre de son bureau), le responsable du département MEP de l'Université Paris Saclay de 2013 à 2018, 1 membre du conseil académique de l'Université Paris-Saclay (V. Doquet, depuis 2015),
- 1 membre du conseil de l'École doctorale SMEMaG de l'Université Paris-Saclay (X. Bouffillon, depuis 2014). Se rajoutent la participation à des comités d'experts HCRES (X. Bouffillon, J. Diani, V. Doquet, P. Le Tallec, P. Bérest ...).
- 1 membre du Comité Directeur du GIS Géosciences Franciliennes (A.Dimanov). V.Doquet fait partie depuis 2018 du Conseil Scientifique élargi, du Laboratoire de Mécanique, Multiphysique, Multiéchelle (LaMcube) de Lille, et Patrick Le Tallec du conseil scientifique de la Direction des Etudes Nucléaires au CEA.

Enfin, depuis juillet 2013, les chercheurs du LMS ont été sollicités pour participer à de multiples jurys d'HDR (X. Bouffillon 2, A. Constantinescu 3, V. Doquet 3, J. Diani 1, P. Le Tallec 1, N. Triantafyllidis 1, D. Chapelle 2) et de thèse.

Politique de recrutement

Pendant la dernière période d'évaluation, trois directeurs de recherche ont rejoint le laboratoire (Julie Diani, Basile Audoly et Eric Charkaluk), et le laboratoire a pu recruter deux Maîtres de Conférences (Martin Genet et Manas Upadhyay). Par ailleurs, un comité de recherche international a été mis en place pour recruter deux professeurs de classe exceptionnelle pour pallier aux départs de Jean Jacques Marigo (2019) et Patrick Le Tallec (2021).

Habilitation à Diriger les Recherches

La période 2013-2018 a vu la soutenance de 4 HDR (Jean Marc Allain, Kostas Danas, Alexandre Dimanov et Dirk Mohr)

Comité expérimental.

Un comité expérimental a été mis en place sous la présidence du Directeur d'Unité. Regroupant l'ensemble des chercheurs concernés par les équipements expérimentaux, les responsables de plateforme, et les ingénieurs de recherche, il se réunit de deux à trois fois par an pour faire un tour de table des plateformes, définir leur politique de développement et mettre en place les besoins de financement associés.

2- Présentation de l'écosystème recherche de l'unité

Le Laboratoire de Mécanique des Solides fait partie du centre de recherche de l'Ecole Polytechnique et bénéficie à ce titre de son activité d'enseignement et de formation, de son infrastructure et de son environnement pluridisciplinaire avec des interactions privilégiées avec des laboratoires tels que le LPCIM (Physique des Couches Minces), le CMAP (Mathématiques Appliquées), le LADHYX (hydrodynamique) ou le LOB (Laboratoire d'Optique et Biosciences). Il a aussi un lien privilégié avec l'INRIA avec la présence de l'équipe commune MEDISIM dans les locaux de l'INRIA.

Au-delà, l'Ecole Polytechnique et quatre autres partenaires éducatifs ont décidé de regrouper leurs efforts pour créer un nouvel ensemble, appelé provisoirement « NewUni ». L'excellence scientifique, la complémentarité et la pluridisciplinarité seront les guides de l'action de NewUni en matière de recherche. Elle sera organisée en quatre facultés : **Natural Sciences and Mathematics**, **Engineering Sciences** regroupant les unités de mécanique, de chimie moléculaire, de physique de la matière condensée et de génie électrique, **Data Sciences and Information Technologies**, et **Humanities & Social Sciences**. Cinq axes prioritaires correspondant à de grandes transitions sociétales actuelles y sont mis en avant :

- | | |
|--|--|
| La transition énergétique et le changement climatique | - Environnement & climat
- Énergie |
| La transition sécuritaire | - Cybersécurité et sécurité numérique |
| La transition numérique | - Intelligence Artificielle et Science des données
- Réseaux et Internet des Objets
- Simulation numérique |
| La transition technologique | - Technologies Quantiques et nanotechnologies
- Matériaux innovants
- Les plasmas et leurs utilisations |
| La transition sanitaire | - Ingénierie Biomédicale |

Sur ces thèmes, le laboratoire est acteur sur les aspects énergie, matériaux innovants et ingénierie biomédicale. A l'échelle régionale, le laboratoire est membre actif du LASIPS (Laboratoire de Sciences de l'Ingénieur du Plateau de Saclay) et de la Fédération d'Ile de France de Mécanique. Enfin, à l'international, le laboratoire a des accords de double diplôme et d'échanges de professeurs et étudiants avec Caltech, et des coopérations actives avec de grandes universités européennes (TU München, Politecnico Milano, ...).

3- Produits et activités de recherche

3-1 Bilan scientifique (par pôle de recherche)

Pôle matériaux

Chercheurs ou enseignants-chercheurs :

Véronique Doquet (DR CNRS), Julie Diani (DR CNRS) depuis Janvier 2016, Alexandre Dimanov (CR CNRS), Jean Raphanel (CR CNRS), Emmanuelle Chabert (PCC EP) depuis septembre 2016, Dirk Mohr (CR CNRS) jusqu'à août 2015, Eric Charkaluk (DR CNRS & PCC EP) depuis sept. 2016, Laurence Bodelot (PCC EP), Kostas Danas (CR CNRS & PCC EP), Nick Triantafyllidis (DR CNRS & prof. EP).

Ingénieure de recherche : Eva Héripré (jusqu'à février 2016)

Post-doctorants restés au moins 12 mois : N. Ben Ali, B. Erice, D. Picard, G. Gu, A. Bonnelye, K. Anoukou, L. Cheng, C. Combescure,, F. Lopez-Jimenez, T.-S. Cao

Domaine d'activité

Le pôle développe une approche multi-échelles du comportement mécanique d'une large gamme de matériaux de structure, fonctionnels ou géologiques, en vue d'établir des lois de comportement et des modèles d'endommagement physiquement motivés, pour des sollicitations thermomécaniques et des environnements variés. L'établissement de liens précis entre microstructure et comportement en vue d'une optimisation des performances des matériaux constitue un objectif central. Le groupe met en œuvre des moyens expérimentaux très riches pour caractériser, sous des sollicitations et environnements représentatifs des conditions d'usage, les comportements à échelle macroscopique (essais bi ou triaxiaux, statiques, cycliques ou dynamiques, accompagnés de mesures des champs cinématiques par corrélation ou stéréo-corrélation d'images), mais aussi à échelle microscopique, par des essais sous MEB (en traction, compression, torsion, flexion, sous hygrométrie contrôlée) ou sous rayonnement synchrotron ou dans un tomographe, accompagnés de corrélation d'images 2D ou 3D, surfacique ou volumique. Des modèles de plasticité cristalline, de changements de phase, de dynamique des dislocations ou d'éléments finis sont développés pour l'analyse des comportements observés. Par sa thématique, le pôle a de très fortes interactions avec les pôles structures et multiphysiques.

Animation scientifique du pôle et par le pôle.

Depuis 2016, un **séminaire interne mensuel** donne aux doctorants, post-doc et chercheurs du pôle l'occasion de présenter leurs travaux et de discuter avec le groupe, de façon informelle et constructive, des méthodes, des modèles et des pistes d'approfondissement. Les chercheurs du pôle constituent par ailleurs une fraction

importante du Comité Expérimental du LMS et ont donc, dans ce cadre, l'occasion d'échanger sur la politique d'équipement des deux plateformes expérimentales du laboratoire.

Les chercheurs et doctorants participent régulièrement à des journées portes ouvertes, visites de laboratoire pour des étudiants, Fête de la Science. Enfin, le pôle contribue régulièrement aux activités de sociétés savantes (SF2M, Mecamat), des Fédérations Franciliennes : F2M et Fermi et de l'Equipex Matmeca.

Production scientifique :

Durant la période sur laquelle porte l'évaluation, les membres du pôle ont été auteurs ou co-auteurs de **74 articles dans des revues à comité de lecture et 15 dans des actes de congrès publiés**, à comité de lecture (liste détaillée plus loin). Depuis 2013 **13 thèses** ont été soutenues dans le cadre du pôle (liste détaillée plus loin).

Collaborations

Le pôle entretient de multiples **collaborations internationales**: Crashworthiness Lab du MIT (thèse de C. Roth en co-tutelle, 2012-2015), Université de Sheffield (co-encadrement stages de 3A/master de T. Tancogne, 2015), Institute of Metal Research, Académie des Sciences de Chine, Shenyang (accueil d'un doctorant, H. Yang, pour 12 mois en 2015-2016), State Key Laboratory for Ocean Engineering- Université Shanghai Jiao Tong (accueil d'une doctorante, L. Meng, pour 12 mois, en 2017-2018), Université de Columbia (co-encadrement du stage EP de L. Guin, 2014), Laboratoire Geomechanisch und Rheologie -GFZ Helmholtz-Zentrum, Potsdam (mise à disposition de moyens d'essais Haute Température - Haute Pression, synthèse d'échantillons, échanges de savoir-faire), CALTECH aeronautic Dept, USA (2 co-publications), Los Alamos Natl Lab, USA, University of New South Wales, Australie, Université de Portsmouth, UK (1 co-publication), Université de Cambridge (2 co-publications), Université de Thessalie, Grèce (1 co-publication)

Les collaborations avec des laboratoires français sont également nombreuses: Laboratoire Navier (ANR MicroNaSel, co-encadrement thèse A. Gaye 2012-2015, collaboration sur la phase de modélisation de la thèse d'A. Goyal 2015-2018), Centre des Matériaux de Mines-ParisTech (2 projets ANR en partenariat, Loterie et Fluti, co-encadrement thèse E. Chaumon et contribution à une étude expérimentale de la thèse de [G. Wolinne](#)), Laboratoire de Mécanique de Lille (co-encadrement de la thèse de D. Roucou 2017-2020), LamsID devenu IMSIA (co-encadrement thèse J.B. Esnault, 2010-2014), UME devenu IMSIA (co-encadrement de 2 stages de M2 2014 et 2016 et Post-Doc Nicolas Thurieau 2015-2017), PIMM-Arts & Métiers (co-encadrement thèse F. de Francqueville, 2016-2019, collaboration sur la fatigue giga-cyclique d'un alliage d'aluminium à grains ultra-fins, projet ANR MicroStress, co-encadrement d'un stage du CNAM), ICMPE (projet ANR Fluti, projet ANR-ASTRID VMPB + co-encadrement thèses B. Barkia 2011-2014 et C. D'Hondt 2017-2020, réalisation des essais sous MEB de Minh Thanh THAI (2014)), ISAE Supaero (co-encadrement thèse M. Ruiz de Sotro 2017-2020), Laboratoire de Géologie de l'ENS (participation à l'expérimentation et à l'encadrement de la thèse d'A. P. Nicolas, 2012-2015), Institut des Sciences de la Terre de Paris, UPMC (participation à l'expérimentation et à l'encadrement de la thèse de C. Parlangeau, 2013-2017), IRDL-Université de Bretagne Sud (contribution aux essais *in situ* de la thèse de S. Hin 2013-2016, 1 co-publication), IRDL-ENSTA-Bretagne (contributions aux essais sous MEB de la thèse de Jean Legendre (2017)), MSSMat (co-encadrement d'un stage Master 2015) Depuis 2015, 3 groupes de travail ont été lancés autour de la microscopie électronique dans le cadre de l'EquipEx MATMECA avec plusieurs laboratoires de Paris-Saclay (ENS-ParisSaclay/LMT, Mines-Paristech/CdM, ONERA/DMSM, CEA/SRMA et EDF/MAI) : GT Imagerie 3D en MEB (pour la mesure de topographie de surface à partir des signaux des différents secteurs du détecteur d'électrons rétrodiffusés) financé pour 1 an par le LASIPS, GT Un bon coup de balais dans nos MEB (pour la correction des erreurs de balayage des MEB lors de prise d'images à très fort grandissement) et le GT Tomo elec (Tomographie électronique en MET).

Recherche partenariale ou sur financement institutionnel

De multiples travaux (liste détaillée plus loin) ont été ou sont actuellement menés en partenariat avec des industriels : EDF, Safran, Michelin, Areva, Technip, SNCF, Airbus Safran Launchers, Total, PSA, AddUp, Geoservices, Schlumberger, Saint Gobain, Arcelor-Mittal ou de grands organismes : CEA, ANDRA, IFPEN. D'autres travaux ont été financés par l'ANR (2 projets portés par le LMS : Loterie et Fluti, 3 participations à 3 projets : MicroNasel et MicroStress ainsi que VMPB (Programme ASTRID)), la Chaire EDF-EP Energie Durable (thèse A. El Sabbagh 2015-2018, post-doc D.Picard) la Mission Interdisciplinaire Needs (projet Mipor 2012-2014)

Principaux résultats juillet 2013 - juin 2018

1) Plasticité en grandes déformations de matériaux poreux et rupture ductile des matériaux métalliques sous chargement quasi-statique ou dynamique.

Au cours de sa thèse visant à développer un modèle constitutif viscoplastique pour des monocristaux poreux à structure cristalline arbitraire et comportant des cavités ellipsoïdales, Armel Mbiakop, sous la direction d'A. Constantinescu et K. Danas, a proposé un modèle basé sur l'homogénéisation variationnelle non linéaire prenant en compte l'évolution de la microstructure et l'anisotropie induite en déformations finies. Ces modèles ont ensuite été développés pour prendre en compte les chargements cycliques (post-doc de L. Cheng) et pour décrire la réponse des composites fortement chargés en particules (article avec V. Deshpande à Cambridge University). L'extension de la méthodologie aux composites à N-phases a donné d'excellents résultats (avec N. Aravas) qui peuvent être appliqué à un grand nombre de matériaux comme les aciers TRIP, les matériaux moulés à la cire perdue ou les métaux contenant des phases intermétalliques. K. Danas a produit à cette date un nombre important de modèles d'homogénéisation qui commencent à trouver leur place dans des applications industrielles (par exemple NIPPON Steel, Arcelor Mittal, code Zebulon, Armée USA etc).

Des travaux (en partie été financés par le projet ANR Loterie, porté par D. Mohr.) couplant étroitement expérimentation, modélisation et simulation numérique ont été menés pour analyser la rupture ductile des métaux à faible taux de triaxialité des contraintes, domaine où peu de données fiables étaient disponibles, tant sur leur ductilité que sur les mécanismes d'endommagement sous-jacents [RCL14-21, 14-37, 15-29, 15-38, 15-43, 16-51, 17-5].

* Pour les tôles minces, des procédures d'essai quasi-statiques ou dynamiques à rupture sous des états de contrainte variés ont été développées, dans le cadre de la thèse de C. Roth (2012-2015) encadrée par D. Mohr et menée en collaboration avec le Crashworthiness Lab du MIT. Un critère phénoménologique de rupture de type Mohr-Coulomb a été formulé et identifié.

* Pour les matériaux plus massifs, des essais à rupture en traction et torsion combinées en proportions variables ont été mis au point sur des tubes entaillés, dans le cadre de la thèse de J. Papisidero (2010-2014) co-encadrée par D. Mohr et V. Doquet [RCL-14-33, 14-34 & 15-46]. Les déplacements mesurés aux bords de la zone entaillée par stéréo-corrélation d'images ont servi de conditions aux limites aux simulations numériques. On a ainsi déterminé les trajets de chargement à rupture (évolution au point critique de la déformation plastique équivalente, de la triaxialité des contraintes et du paramètre de Lode) pour un acier et un alliage d'aluminium. Les résultats obtenus sur l'alliage d'aluminium suggèrent, à l'encontre d'une étude largement citée, une ductilité plus élevée à triaxialité nulle qu'à triaxialité moyenne, ce dont un critère d'endommagement de type Hosford-Coulomb a permis de rendre compte. Un effet notable (bénéfique ou néfaste, selon les cas) des chargements non monotones ou non proportionnels sur la ductilité a été mis en évidence. Sa prise en compte a nécessité l'introduction d'une règle de cumul non linéaire du dommage. Les processus de localisation de la déformation et d'endommagement ont été étudiés par des observations au MEB à l'issue d'essais interrompus à divers taux de déformation (stage de master de S. Lepeer), mais aussi en temps réel, lors d'essais de torsion menés dans le MEB et enfin, par un suivi 3D en temps réel de l'endommagement par laminographie, lors un essai de fissuration sous rayonnement synchrotron (en collaboration avec T. Morgener du Centre des Matériaux). On a ainsi mis

en évidence la croissance de certaines cavités, même en cisaillement pur, qui contraste avec l'affaissement total prédit par les modèles de cellule élémentaire et qui semble lié à un allongement axial significatif (effet Swift). On a montré que les réorientations dues au cisaillement très intense amènent de plus en plus de grains en coïncidence, permettant aux microfissures amorçées précocement, mais ne se développant pas au-delà des joints de grains. La localisation par cisaillement conduisant au « void sheeting » apparaît finalement comme le mécanisme prédominant de rupture à faible taux de triaxialité.

Dans le cadre d'une collaboration avec le MIT et l'université de Sheffield, Thomas Tancogne-Dejean (X2012) a mené, au cours de son stage de troisième année, une étude exploratoire sur la rupture ductile de l'alliage de titane Ti-6Al-4V issu de la fabrication additive (selective laser melting). Au cours de son stage de master il a ensuite développé, avec E. Heripré, des essais de rupture ductile sur des éprouvettes minces monocristallines micro-usinées au FIB et sollicitées en cisaillement sous MEB, les champs cinématiques obtenus par DIC servant à l'identification d'un modèle de plasticité cristalline.

La problématique de la rupture ductile sous des chargements complexes non-proportionnels est également au centre de la thèse de M. Ruiz de Sotro (financée par Safran et co-encadrée par V. Doquet et P. Longère de l'ISAE) où elle s'enrichit en outre du caractère dynamique et cyclique des sollicitations (impacts d'oiseaux sur les bords d'attaque de turbines aéronautiques en alliage de titane). Une importante campagne d'essais quasi-statiques et dynamiques (aux barres d' Hopkinson) a été menée sur des géométries d'éprouvettes variées pour 1) permettre l'identification d'une loi de comportement thermo-visco-plastique anisotrope prenant en compte l'asymétrie traction-compression du matériau et son écrouissage cinématique 2) permettre l'analyse des mécanismes d'endommagement sous des états de contrainte variés et leur modélisation et 3) comparer et analyser les performances de diverses microstructures biphasées

2) Viscoplasticité de matériaux cristallins, glissement aux joints de grains.

Exploitation des mesures de champs à l'échelle des grains

Ces travaux traitent de la mise en œuvre et du traitement de mesures de champs à l'échelle des grains en vue de fournir des données pertinentes pour les modèles de plasticité cristalline. Un premier volet concerne les mesures couplées de champs de déformation et de température à l'échelle micrométrique. Un traitement de ces données, basé sur une technique de projection des champs de température et de déplacement sur une base polynomiale propre à chaque grain, permet d'étudier la plasticité directement à l'échelle des grains et de corrélérer l'apparition de bandes de glissement avec une activité thermique locale, démontrant ainsi l'intérêt de réaliser des bilans d'énergie intragranulaires. Un second volet s'intéresse à la représentativité des données de texture et de désorientations obtenues par EBSD, en vue de leur utilisation dans des modèles de plasticité cristalline. Un traitement des données d'orientations granulaires mesurées permet, à partir d'outils statistiques, de déterminer le plus petit échantillon d'orientations nécessaire pour être représentatif d'une texture donnée. Ces mêmes outils statistiques, appliqués aux données de désorientations entre grains, permettent également d'identifier jusqu'à quel rang les désorientations concernées ont un poids significatif dans la distribution des désorientations à prendre en compte dans les modèles. L'article exposant ces travaux [RCL-14-10] a reçu le prix Werner Köster du meilleur article de l'année du Journal of Material Research, décerné par la German Society for Materials Science (DGM). Enfin, un protocole expérimental, associant des mesures EBSD pré- et post-chargeement ainsi que des mesures in-situ de champs de déformation à l'échelle des grains lors d'essais aux barres d'Hopkinson a permis d'étudier l'effet de la taille de grains sur les phénomènes de localisation plastique sous chargement dynamique. Les essais menés sur du cuivre OFHC ont ainsi permis de mettre en évidence un comportement très différent en fonction de la taille des grains. Les échantillons de taille de grain inférieure à 100 μm ont montré une dépendance marquée à la vitesse de sollicitation à travers un durcissement macroscopique notable, une recristallisation dynamique dans la zone de localisation (conduisant à une diminution de la taille de grains) et peu de changement de texture. Pour une taille moyenne des grains de 200 μm , aucune dépendance à la vitesse de déformation n'a été notée. En revanche, un changement de

texture marqué a été observé dans les zones de localisation plastique et accompagné d'un phénomène non commun de croissance de grains. L'analyse des KAM (kernel average misorientation) dans ces zones de croissance laisse supposer que ce mécanisme est associé à de la relaxation thermique, soulignant l'intérêt d'aller vers des mesures thermomécaniques couplées micrométriques sous chargement dynamique.

Titane

Dans le cadre du projet ANR Fluti, en partenariat avec le Centre des Matériaux de l'EMP, l'ICMPE et le LSI, une étude multi-échelles de la viscoplasticité à l'ambiante et de la rupture différée du titane en relation avec ses teneurs en oxygène et hydrogène a été menée [RCL 15-10, 15-11, 15-22, 16-18, 17-5]. L'influence de l'oxygène et de l'hydrogène en solution, ainsi que l'anisotropie du comportement du titane ont été analysés par Bassem Barkia (thèse et post-doc co-encadrés par V. Doquet et I. Guillot) au moyen d'essais de traction avec sauts de vitesse, relaxation et fluage, traction sous microscope optique, sous MEB avec mesure des champs de déformation et sous MET, à ICMPE. Ces derniers essais ont permis d'observer en temps réel le glissement saccadé des dislocations, leurs mécanismes de multiplication, glissement dévié et annihilation. On a ainsi montré que l'oxygène en solution accroît les temps d'attente et réduit les longueurs de saut. Les dislocations effectuent très fréquemment des glissements déviés entre les plans prismatiques, basal et pyramidaux. On a montré qu'en plus d'un fort durcissement, l'oxygène provoque un accroissement de sensibilité à la vitesse et un vieillissement dynamique aux faibles vitesses de déformation qui freine le fluage. L'oxygène réduit en outre la propension au maclage et favorise le glissement pyramidal de type $\langle c+a \rangle$. L'hydrogène en solution écran les interactions des dislocations avec les atomes d'oxygène, abaissant le seuil de fluage à froid et accélérant celui-ci. Les essais de traction sous MEB ont mis en évidence de fortes localisations de déformation près des joints de grains, où les contraintes de compatibilité sont particulièrement fortes et souvent accommodées par du glissement aux joints. Le stage de master de J. Janowickz a permis d'approfondir ce phénomène inattendu à la température ambiante, grâce à la combinaison de mesures à l'AFM et au MEB des discontinuités de déplacement aux joints de grains et à des simulations par éléments finis en viscoplasticité cristalline. Un modèle de viscoplasticité cristalline en champ moyen rendant compte du comportement viscoplastique anisotrope a par ailleurs été identifié. En tenant compte des différences de sensibilités à la vitesse des divers systèmes de glissement on a pu rendre compte également de l'anisotropie de la sensibilité à la vitesse et expliquer les changements des contributions des divers systèmes de glissement avec la vitesse. Enfin, des essais de rupture différée menés sous MEB et accompagnés de mesures des déformations en pointe de fissure (stage de M1 de X. Cheng) ont mis en évidence le rôle du fluage à froid dans ce mode de fissuration.

Magnésium

Du magnésium à grains fins, à forte anisotropie plastique, a été étudié lors d'un stage de M2, dans le but de caractériser le glissement aux joints de grains. Les essais ont montré l'activation de ce phénomène, même à température ambiante. Des essais de nano-indentation de micro-éprouvettes prélevées par FIB devraient permettre l'étude à l'échelle très fine du comportement d'interfaces, si le projet ANR déposé sur ce thème par A. Dimanov est retenu.

Sel gemme

Dans le cadre de la thèse d'Ababacar Gaye, co-dirigée par Michel Bornert, Alexandre Dimanov et Karam Sab et financée par l'ANR MicroNaSel, ont été obtenus 1) les tout premiers champs 3D de déformation plastique d'un polycristal de NaCl, 2) la toute première comparaison des champs cinématiques de surface (mesures Optique et MEB) et en volume (mesures RX-MCT) sur un polycristal de NaCl plastiquement déformé, 3) la première comparaison de microstructures cristallines 2D (mesures EBSD) et 3D (mesures RX-DCT) 4) la première quantification précise du glissement aux joints de grains du NaCl à 20°C et 350°C. Ces travaux ont nécessité la fabrication d'échantillons comportant des marqueurs en volume (3 % vol. de particules de Cu), des développements techniques et expérimentaux et de nombreux développements de nos logiciels de corrélation d'images [RCL-2014-44].

Au cours de son post-doc, D. Picard a établi les lois de comportement du monocristal de sel entre 20°C et 400°C, avec le support de mesures de champs multi-échelles. Ces données qui montrent une importante anisotropie plastique à basse température se révèlent essentielles pour l'interprétation des résultats sur le polycristal, notamment de la nécessité du glissement aux joints, car elles montrent qu'aux températures ambiante et moyennes, le nombre de systèmes de glissement indépendants activables est insuffisant.

Une étude du fluage à très long terme du sel gemme sous très faibles charges a été réalisée en collaboration entre les pôles Structures et Matériaux (post-doc d'A. Bonnelye, A. Dimanov), afin d'élaborer une loi de fluage aux très faibles vitesses ($< 10^{-10}\text{s}^{-1}$). Dans ces conditions, les données expérimentales sont très rares et les mécanismes de déformation particulièrement mal connus. On a pu mesurer des vitesses de fluage d'échantillons de sel gemme naturel et synthétique (polycristal et monocristal) de 10^{-11} à 10^{-13} s $^{-1}$. Les déformations correspondantes étant très faibles, les mesures ne peuvent se faire que pour des durées expérimentales de plusieurs années, dans des cavités salines souterraines, dans lesquelles les fluctuations de température sont contrôlées au 1/100^{ème} de degré. Les résultats montrent que la loi de fluage aux faibles charges diffère de celle aux charges plus élevées appliquées en laboratoire. Le monocristal flue le plus lentement, les échantillons synthétiques à grains fins le plus rapidement. Les interfaces semblent donc avoir un rôle important. L'étude continue en se focalisant sur l'effet de l'humidité et des mécanismes potentiels de dissolution-précipitation actifs aux joints de grains.

Alliage d'aluminium à grains ultra-fins

Dans le cadre de sa thèse, dirigée par V. Doquet, A. Goyal a comparé le comportement et les mécanismes de déformation viscoplastiques d'un alliage d'aluminium-magnésium à microstructure "classique" et à grains ultrafins (60 à 800nm) obtenu par déformation plastique sévère (procédé ECAP dans un premier temps au LEM3, puis à l'aide de la filière coudée chauffante conçue et réalisée au LMS). Par des essais de relaxation, fluage et traction à diverses vitesses et températures, elle a pu mesurer les évolutions des sensibilités à la vitesse des deux états microstructuraux en fonction de ces deux paramètres et montrer: 1) que le raffinement microstructural accroît sensiblement la sensibilité à la vitesse, 2) que ce paramètre augmente avec la vitesse de déformation, 3) qu'il contrôle la ductilité du matériau à grains ultrafins, qui s'accroît donc à faible vitesse, 4) que cette ductilité devient supérieure à celle du matériau "classique" lorsque la température s'élève. Les domaines de vitesse et température dans lesquels le raffinement microstructural accroît ou diminue la résistance en traction (selon que les joints de grains constituent ou non des barrières pour les dislocations) ont été délimités. Par ailleurs, une procédure de mesures des champs de déformation à très haute résolution spatiale (quelques dizaines de nanomètres, grâce à un marquage nanométrique très dense de la surface, par démouillage d'un film d'or) permettant d'analyser les localisations de la déformation et l'endommagement aux échelles pertinentes, lors d'essais mécaniques sous MEB a été mise au point. Elle a permis de mettre en évidence le glissement coopératif aux joints de grains de forte désorientation. Un modèle viscoplastique intégrant, de façon paramétrable, le glissement aux joints (contrainte-seuil, viscosité, sensibilité à la vitesse...) est en cours de développement, en collaboration avec A. Pouya du laboratoire Navier à l'ENPC. Une étude comparée de la plasticité cyclique et des mécanismes d'endommagement en fatigue oligo et poly-cyclique de l'alliage classique ou à grain ultrafins est en cours et sera prolongée par une étude en fatigue giga-cyclique (séjour de Li Meng, doctorante chinoise) en collaboration avec le PIMM-Arts & Métiers.

Alumine nano-cristalline

Une étude du fluage d'une alumine nanocristalline a été réalisée en partenariat avec Saint Gobain, lors des post docs de D. Picard et d'A. Gaye. Des observations MEB répétées, lors d'essais de fluage interrompus ont permis d'étudier le comportement ductile du matériau, à 1200°C. La recherche d'une technique de marquage de surface adaptée à l'échelle d'observation et résistant aux très hautes températures est en cours, pour permettre la mesure des champs cinématiques par corrélation d'images.

Aluminium et Inconel

Dans le cadre de la Thèse d'Alexandre El Sabbagh dirigée par A. Dimanov et J. Raphanel, l'accent a été spécifiquement mis sur la caractérisation expérimentale du comportement des interfaces à haute température. Il s'agissait d'identifier pour l'aluminium recuit (à gros grains équiaxes) déformé en compression entre 20 et 300°C les systèmes de glissement opérationnels dans les grains, mais surtout les mécanismes actifs aux interfaces, et notamment le glissement aux joints de grains (GJG). Des développements spécifiques ont permis d'améliorer les dispositifs de chauffage des échantillons sous MEB et de mesure de température (par pyrométrie infrarouge). L'asservissement et l'homogénéité de la température ont été améliorés et la zone d'observation élargie à l'ensemble de l'éprouvette. Des techniques de marquage de surface multi-échelles par micro-lithographie électronique et démoillage de films minces métalliques ont permis d'adapter la base de mesure des champs locaux, afin de couvrir toutes les échelles d'observation, depuis celle (macroscopique) de l'échantillon, jusqu'à celles (mésoscopiques et microscopique) de l'agrégat de grains et de l'interface individuelle, respectivement. Le glissement aux joints de grains s'avère inévitable, même pour des matériaux à gros grains présentant une symétrie cristallographique favorable (système cubique à faible anisotropie plastique) et d'autant plus actif que la température est élevée, malgré l'homogénéisation de la déformation intra-cristalline. La quantification précise de la contribution du GJG à la déformation globale est en cours. L'analyse du comportement viscoplastique et la modélisation intégrant plasticité cristalline et GJG sont cependant compliquées par des phénomènes de migration des interfaces, également très actifs à haute température. L'étude de Inconel est abordée avec la même démarche. Cependant, dans l'impossibilité de dépasser 800°C dans le MEB, les essais de compression seront réalisés ex situ, avec une machine de fluage traditionnelle.

Aciers TWIP

Dans le cadre d'un programme d'échange entre l'Académie des Sciences de Chine et le CNRS, Haokun Yang, doctorant au Shenyang National Laboratory for Materials Science a été accueilli pour un an au laboratoire (sept 2015-2016). Sous la direction de V. Doquet, il a mené une étude micromécanique du rôle du maillage dans l'érouissage monotone et cyclique d'aciers TWIP, à la fois très résistants et très ductiles. Une méthode originale de mesure des fractions de macles par grain, reposant sur des mesures de relief à l'AFM, combinées à l'EBSD, la corrélation d'image et à l'inversion des équations cinématiques a été développée [RCL-16-21]. Il a également analysé l'influence de l'énergie de faute d'empilement de ce type d'aciers sur leur résistance à la fissuration par fatigue [RCL-17-31]. Ces travaux ont mis en évidence des insuffisances dans la compréhension et la modélisation des mécanismes de plasticité cyclique de ces matériaux, que la thèse de C. D'Hondt (2017-2020, co-encadrée par V. Doquet et J.P. Couzinié de l'ICMPE, avec un soutien matériel d'Arcelor Mittal) vise à éclaircir, notamment via des essais cycliques sous MET et sous AFM.

Graphène

Une étude par dynamique moléculaire du comportement mécanique du graphène mono et polycristallin a été menée dans le cadre d'échanges avec l'Université de Columbia (projet de M1 Ecole Polytechnique). Le graphène monocristallin est un matériau bidimensionnel à la résistance exceptionnelle, mais difficile à produire, surtout au-delà d'une certaine surface. Il était intéressant de déterminer la résistance de bi-cristaux et comment celle-ci varie selon la nature du joint de grain, en distinguant des cristaux fortement ou peu désorientés de cristaux. L'étude s'est focalisée sur la description de la structure du joint de grains en termes d'unités structurales (modélisation par un motif périodique plus ou moins complexe), en tirant profit de la nature 2D des joints. Cette étude a permis l'établissement d'une loi de traction-séparation de l'interface qui peut être introduite via des éléments cohésifs dans des simulations du comportement à plus grande échelle.

3) Matériaux amorphes

Cicatrisation des fissures dans un verre borosilicate

La température au cœur des colis de déchets radioactifs vitrifiés restant élevée pendant une longue période, ceci laisse espérer une cicatrisation au moins partielle des multiples fissures qu'ils contiennent, également envisageable lors d'un contact prolongé avec l'eau souterraine, une fois la température redescendue. Une étude expérimentale et numérique de la cicatrisation thermiquement ou hydriquement induite de fissures, assistée par une compression, a donc été menée sur un verre borosilicate. Des éprouvettes DCDC ont donc été pré-fissurées sous MEB et les profils d'ouverture des fissures mesurés sous des charges données. Elles ont ensuite été recuites à diverses températures, à l'air ou sous vide secondaire, avec ou sans compression normale au plan de la fissure puis re-sollicitées sous MEB où leurs profils d'ouverture ont été à nouveau mesurés et comparés aux profils initiaux. La formation de ponts de matière extrêmement complaisants, (puisqu'ils tolèrent jusqu'à 150% d'étirement sans rupture ni décollement), entre les lèvres des fissures, a été mise en évidence. Un modèle éléments finis avec des éléments d'interface dans les zones pontées a permis de rendre compte des profils d'ouverture mesurés, d'estimer la résistance des ponts et d'expliquer pourquoi la re-propagation des fissures partiellement cicatrisées survient par ré-amorçage d'une branche en arrière de la pointe initiale. La cicatrisation s'avère d'autant plus complète qu'elle s'effectue sous compression normale, à une température élevée et en présence d'humidité. Le stage de master de S. Yoon a en outre montré qu'un simple séjour de 15 jours dans l'eau à 90°C est tout aussi efficace qu'un recuit à plus de 400°C pour la cicatrisation des fissures [RCL-14-20].

Modélisation avancée des polymères

Dans le cadre de la thèse de J. Guillé (2010-2014) menée en collaboration avec Michelin, sous la direction de P. Le Tallec, l'extension, la validation thermodynamique et l'implémentation d'un modèle de cristallisation anisotrope sous contrainte ont été menés à bien, ainsi que le développement de modèles sur réseau pour les élastomères, avec application à des problèmes d'endommagement et de cristallisation sous contrainte. Enfin, de nouvelles stratégies de passage à l'échelle macroscopique ont été mises en œuvre [RCL-15-21, 15-30].

Dans le cadre de la thèse de F. De Francqueville (2016-2019), co-encadrée par J. Diani, financée par Airbus Safran Launchers et menée en collaboration avec le PIMM, nous travaillons à rationaliser la définition de nouveaux propérgols solides en maîtrisant la relation structure/propriétés mécaniques de ces matériaux extrêmement chargés en particules micrométriques, afin d'assurer une bonne intégration aux applications industrielles requérant des limites spécifiques de contrainte et déformation à rupture. Pour ce faire, on cherche à mettre en évidence expérimentalement l'impact de l'endommagement sur le comportement de ces matériaux. Une modélisation éléments finis intégrant un modèle de zone cohésive à l'interface polymère-renfort a permis d'étudier l'impact des paramètres de microstructure et de zone cohésive sur le comportement mécanique de ces matériaux. On cherche maintenant à enrichir le modèle en prenant en compte le comportement viscohyperélastique de l'élastomère et sa dépendance à la température.

L'impact d'un pré-chargement sur la rupture d'élastomères chargés en particules nanométriques de noir de carbone est abordé dans le cadre de la thèse de D. Roucou (2017-2020) co-encadrée par J. Diani, financée par Michelin et menée en collaboration avec le LML. En effet, pour certaines applications de génie civil, la rupture catastrophique de ces matériaux peut intervenir après un très faible nombre de cycles. Des travaux préliminaires ont montré qu'il est nécessaire de définir un critère objectif tridimensionnel de rupture avant d'étudier l'impact de préchargements.

4) Fluage et rupture de matériaux géologiques

Argilite

Une étude menée par A. Dimanov, A. Bonnelye, H. Gharbi en collaboration avec l'Andra vise à la fois une caractérisation du fluage à moyen terme en extension (essais triaxiaux en laboratoire) et à long terme, sous faible charge (en cavité saline) avec une attention particulière aux effets de l'anisotropie naturelle (litage). Les essais en extension sur les matériaux argileux sont très peu nombreux, or ce sont les conditions de chargement

les plus représentatives en proche paroi de tunnel. Les essais sous faible charge doivent permettre de déterminer l'existence ou non d'un seuil de fluage et de fournir des données plus aisément extrapolables aux conditions naturelles.

Par ailleurs, nous cherchons à mettre en évidence les micro-mécanismes impliqués dans la déformation irréversible et l'endommagement de ce matériau anisotrope, complexe et composite. Nous réalisons donc des essais sous MEB et sous MCT (tomographe et synchrotron), sous chargement mécanique, dans des conditions d'hygrométrie contrôlées, mais aussi sous chargement hydrique, afin de cartographier les déformations irréversibles liées au gonflement/retrait des feuillets des particules d'argile lors des variations d'hygrométrie [RCL-14-42, 14-45, 14-47, 14-48, 15-55, 15-56]. Les résultats montrent lors du chargement mécanique l'activation en ouverture/ fermeture ou cisaillement de microfissuration au niveau d'interfaces et de discontinuités préexistantes (matrice-inclusion, microfissures). Le milieu se comporte comme un matériau granulaire cohésif, à grains rigides indéformables (inclusions détritiques de calcite et de quartz, ou de pyrite) ou ductiles et complaisants (granulats argileux). La déformation axiale macroscopique (de l'ordre du %) résulte de l'activation des discontinuités entre différents types de « grains » et leur réarrangement relatif. La déformation diffuse propre aux grains argileux est difficilement quantifiable, faute d'une base de mesure suffisamment fine pour être représentative de la particule d'argile (de l'ordre de quelques micromètres). En effet, la nécessité de maintenir le matériau humide (85 % HR) dégrade l'imagerie en mode environnemental, et le gonflement local propre au matériau argileux diminue l'intensité des contrastes locaux et les étale spatialement, ce qui empêche de réduire la base de mesure. Des essais continuent pour améliorer ces aspects en ajoutant un marquage de surface artificiel. Enfin, des essais uniaxiaux sous microscopie optique et en contraste d'absorption (MCT) sous faisceau synchrotron (Soleil, ligne Psiché) ont été réalisés sur échantillons lisses ou percés, afin de déterminer les modes d'endommagement. La propagation de fissuration est contrôlée par l'orientation du litage par rapport à l'axe de chargement. Des essais d'hydratation/dessiccation sous MCT ont aussi été réalisés et sont en cours d'analyse par CIN 3D.

Carbonates

Dans le cadre de la thèse de L. Zinsmeister en partenariat avec l'IFPen nous avons réalisé des essais hydromécaniques sur matériaux carbonatés représentatifs des roches réservoir calcaires. En effet, les aquifères salins sont pressentis en vue du stockage géologique durable (séquestration) du CO₂. Or le CO₂ dissous acidifie la saumure, ce qui entraîne des interactions fluides-roche, dont les conséquences mécaniques devaient être évaluées. Des essais d'altération diffuse en milieu acide ont été menés, afin d'évaluer l'évolution de porosité, de perméabilité et de résistance mécanique des matériaux altérés. L'accroissement de porosité due à l'attaque acide n'entraîne pas d'augmentation systématique de perméabilité, à cause de la mobilisation de particules fines qui bouchent les gorges des pores. Les propriétés mécaniques sont par contre considérablement dégradées. Les mesures de champs cinématiques réalisées lors d'essais uniaxiaux sous microscopie optique et MEB ont révélé pour les matériaux altérés une localisation très prononcée de la déformation au niveau des interfaces des grains oolitiques (agrégats de grains micritiques de calcite). L'acidification des fluides entraîne donc la fragilisation du ciment calcique au niveau des oolites, conférant au matériau un caractère granulaire peu cohésif et peu résistant. Des essais mécaniques en cellule triaxiale sous tomographie RX couplés aux mesures de champs 3D ont démontré que le matériau sain et résistant à un comportement fragile (développement de surfaces de fracturation nettes), alors que le matériau altéré présente un comportement compactant cisailant, avec la formation de larges bandes de localisation. L'étude montre donc que sur le long terme, l'injection de CO₂ peut limiter la perméabilité du fait du charriage de micro-débris, mais aussi du fait de la possible formation de bandes de compaction en lien avec la fragilisation de la microstructure oolitique.

Dans une étude en collaboration avec le LG de l'ENS Paris (thèse d'A. Nicolas) la possibilité de fluage à long terme de carbonates micritiques (grains très fins de calcite) a été mise en évidence, sur des matériaux sains ou pré-endommagés sous chargement triaxial, avec un suivi des émissions acoustiques. Les matériaux, surtout pré-

endommagés, ont montré une capacité au fluage non négligeable. Aux faibles vitesses le matériau carbonaté se comporte de façon semi-fragile/ductile, en mettant en œuvre des mécanismes de plasticité (glissement et maclage) et des phénomènes de dissolution-précipitation. Les signatures microstructurales correspondantes ont été mises en évidence grâce au polissage ionique, qui évite la perturbation mécanique du polissage classique.

5) Fatigue, fissuration et effets d'environnement

Dans le cadre de sa thèse sur la fatigue et la fatigue-corrosion en tension biaxiale des connecteurs de risers de forage pétrolier offshore, menée en partenariat avec IFPEN, sous la direction de V. Doquet, , Vidit Gaur [RCL-16-20 & 16-21] a montré que l'effet d'une tension cyclique biaxiale sur la durée de vie dépend de façon non linéaire du taux de biaxialité et peut être bénéfique ou néfaste. Il a formulé un critère d'endurance permettant d'en rendre compte, ainsi que de l'effet, également non linéaire, d'une tension moyenne. Il a par ailleurs montré que contrairement à ce que l'on pouvait craindre, la biaxialité positive du chargement n'aggrave pas les effets de l'environnement marin. Enfin, il a mis en évidence et analysé, par des simulations numériques, la transition d'un amorçage superficiel des fissures à un amorçage interne à partir de défauts, lorsque la contrainte moyenne sur le cycle augmente.

Une étude expérimentale et numérique en 3D du développement en fatigue d'une fissure partiellement déversée dans une tôle mince a été menée par Jean-Baptiste Esnault au cours de sa thèse co-encadrée par V. Doquet et P. Massin du Lamsid [RCL-14-22]. Des essais menés à l'air ou dans une solution saline, sur un alliage d'aluminium et un acier ont montré que le trajet des fissures dépend de l'environnement, un milieu corrosif retardant leur déversement et stabilisant leur propagation plane en mode I. Les formes et positions successives du front de fissure ont été déterminées, ainsi que la topographie des surfaces de rupture. Des outils numériques ont été développés pour tirer de ces données les « level sets » nécessaires à la modélisation des fissures dans un code X-FEM et aux calculs des facteurs d'intensité de contrainte, K_I , K_{II} et K_{III} en tout point du front. L'analyse numérique a montré que dans les zones déversées, les modes II et III contribuent tout aussi efficacement à la propagation que le mode I. Un critère de fatigue qui prévoit un changement progressif de plan critique selon l'amplitude du chargement a été implanté dans un modèle éléments finis 3D. L'application locale du critère devant chaque nœud du front, après un calcul élasto-plastique, a permis de rendre compte de l'apparition et de l'élargissement progressif des lèvres de cisaillement.

La thèse Cifre d'A. Jouan (2014-fev 2018), dirigée par A. Constantinescu et menée en partenariat avec Schlumberger a porté sur l'influence du vieillissement en atmosphère confinée sur la durée de vie en fatigue de joints adhésifs. Une caractérisation viscoélastique des joints a été effectuée par DMA, ainsi qu'une étude numérique de l'hétérogénéité microstructurale matrice/charges. Les faciès de rupture des joints par fatigue sous divers environnements ont été analysés, pour déterminer les mécanismes d'endommagement et un modèle du comportement en fatigue a été formulé et identifié.

Dans le cadre de sa thèse en partenariat avec la SNCF, sous la direction de V. Doquet, Th. Bonniot [RCL-18-8] a identifié, à partir d'essais de fissuration en flexion asymétrique accompagnés de mesures précises des débattements dans le plan et hors plan et de calculs élasto-plastiques 3D, une loi cinétique intrinsèque de fissuration par fatigue en mode II + III corrigée des effets du frottement, pour un acier à rail. Il aborde maintenant la fissuration en mode I + II sous des trajets non-proportionnels représentatifs de ceux calculés pour des fissures dans les rails.

6) Matériaux issus de la fabrication additive

L'absorption d'énergie lors d'impacts par des structures en nids d'abeilles issues de fabrication additive a été optimisée, dans le cadre du post-doctorat de Borja Erice, encadré par D. Mohr. Une approche probabiliste de

la rupture ductile d'un alliage de titane Ti-6Al-4V obtenu par fabrication additive a été développée dans le cadre du stage de T. Tancogne-Dejean, encadré par D. Mohr [RCL 16-51].

L'arrivée en décembre 2016 d'une machine de fabrication additive au LMS (projet DGA-X-ENSTA, machine Mobile BEAM du type DLM, Direct Laser Melting) permet à Y. Balit (2016-2019), dans le cadre de sa thèse co-encadrée par E. Charkaluk et A. Constantinescu et financée par SNCF et DGA, d'étudier l'impact des paramètres du procédé sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un acier inoxydable austénitique, notamment en fatigue et d'aborder la réparation de structures métalliques, en acier ou en Inconel.

Projet scientifique : on se référera au projet présenté dans le cadre des études microstructures propriétés.

SWOT pôle matériaux

<p>Points forts</p> <p>Richesse et diversité des moyens expérimentaux</p> <p>Grande maîtrise des ITA.</p> <p>Rôle fédérateur des plateformes</p> <p>Chercheurs avec compétences en expérimentation et modélisation/simulation.</p> <p>Liens forts avec l'enseignement (EP et masters)</p> <p>Bonne insertion dans des structures ou associations régionales ou nationales</p> <p>Collaborations fortes avec le monde industriel.</p> <p>Soutien de multiples chaires : (PSA, Arkema, Total, EDF) et de la DGA</p>	<p>Points faibles</p> <p>Difficulté de recrutement sur la thématique géo-micromécanique.</p> <p>Manque de compétences en dynamique moléculaire / atomistique.</p> <p>Accès limité à la microscopie en transmission.</p> <p>Rayonnement international du pôle améliorable</p>
<p>Opportunités</p> <p>Développement de la thématique matériaux polymères</p> <p>Utilisation de nouveaux procédés (impression 3D)</p> <p>Arrivée en 2019 d'un enseignant-chercheur maîtrisant la modélisation par FFT en plasticité cristalline et celle des joints de grains par la théorie des disclinations</p>	<p>Risques</p> <p>Difficulté à acquérir (coût) et maintenir (personnel) des moyens expérimentaux adaptés aux matériaux étudiés.</p> <p>Le déménagement vers le pôle Méca va fortement ralentir l'activité expérimentale et pourrait mettre en difficultés doctorants/post-docs</p> <p>Risque de perte de compétence sur le comportement et l'endommagement notamment en dynamique des matériaux.</p> <p>Risque d'éparpillement</p>

Pôle structures

Chercheurs et enseignants-chercheurs

Basile Audoly (DR CNRS & PA EP, depuis 01/01/2016), Pierre Bérest (DR Mines ParisTech), Xavier Boutillon (DR CNRS), Eric Charkaluk (DR CNRS & PCC EP depuis 01/09/2016), Andrei Constantinescu (DR CNRS), Kostas Danas (CR CNRS & PCC EP), Patrick Le Tallec (Prof. EP), Daniel Weisz-Patrault (CR CNRS), Nick Triantafyllidis (DR CNRS et Prof EP)

Ingénieur de recherche

Sylvain Durbecq, Fabrication Additive, CDD Ecole Polytechnique, 2017-2018.

Post-doctorants restés 12 mois ou plus

T. Putelat (2010 – 2013), F. Lopez-Jimenez (2011–2013), K. Anoukou (2014 – 2015), C. Combescure (2014 –2015), G. Scalet (2015), L. Cheng (2015-2016) et G. Nika (2016-2018).

Domaine d'activité

Le Pôle « comportement et durabilité des structures » s'intéresse à la modélisation de structures complexes et à l'étude de leur comportement. Les travaux sont le plus souvent théoriques ou numériques et comportent dans certains cas l'analyse de campagnes expérimentales.

Production scientifique :

Durant la période sur laquelle porte l'évaluation, les membres du pôle ont été auteurs ou co-auteurs de **125 articles dans des revues à comité de lecture. 15 thèses** ont été soutenues dans le cadre du pôle.

Collaborations

Le pôle entretient de très nombreuses collaborations industrielles que ce soit sous la forme de chaires (PSA, Arkema) de projets pluriannuels (DGA), ou de contrats de recherche associés à des travaux de thèse (Geostock, Total, CEA, Schlumberger, Michelin, Safran, Thales, SNCF, Arcelor Mittal).

Au niveau international, les partenariats développés concernent Caltech et l'Université du Texas à Austin aux USA, Saint Petersburg, ETH Zürich, Pavie, Naples et Utrecht en Europe.

Principaux résultats juillet 2013 - juin 2018

1) Géostrucures et stockage souterrain

Le stockage d'hydrocarbures en cavités salines est une source traditionnelle de recherches au LMS. Ce thème est renouvelé par la demande des *traders* pour des modes d'exploitation plus agressifs consécutifs aux dérégulations, qui soulèvent des problèmes mécaniques et thermodynamiques originaux, et par les nombreux projets de stockage en aval de la production d'électricité par des procédés intermittents qui supposent des cycles de pression journaliers.

Les études sont conduites au laboratoire et dans des cavités réelles.

Dans le domaine du comportement rhéologique du sel gemme, des essais de fluage sous faibles charges (inférieures à 1 MPa), conduits dans une galerie minière pour bénéficier d'une température constante au centième de °C près, ont été poursuivis sur trois sels distincts dans le cadre d'un contrat avec le Solution Mining Research Institute auquel sont associés, hormis Engie, des partenaires américains, allemands et néerlandais. On a mis en évidence la durée du régime transitoire initial. Les vitesses de déformation observées, très lentes (10^{-13} - 10^{-12} s⁻¹) et jamais observées jusque-là, sont néanmoins bien plus rapides que ne le prévoit l'extrapolation des essais effectués sous plus forte charge. On pense avoir clairement mis en évidence l'importance du mécanisme de dissolution-précipitation qui l'emporte dans ce domaine de chargement sur les mécanismes liés aux dislocations, caractérisé par un fluage Newtonien et l'influence de la taille des grains. Des essais mettant en évidence le fluage inverse (augmentation de hauteur d'une éprouvette après diminution d'une charge compressive) sous faible charge ont été conduits et une loi empirique prenant en compte deux mécanismes ont été proposés. On vient d'adapter le dispositif pour appliquer des charges dans le domaine 1 MPa - 5 MPa, qui n'a jamais été exploré à température ordinaire et, en collaboration avec l'université d'Utrecht, un nouveau programme étudie l'influence de la teneur initiale en saumure.

Dans le cadre de l'ANR FluidStory dédiée au stockage d'O₂ et CO₂ pour la méthanation de l'hydrogène, on étudie la perméabilité du sel au moyen de boules creuses de sel. La conception d'un essai de cyclage de la pression dans une caverne e stockage d'hydrogène dans le sel, avec notamment Engie et Air Liquide. Il a été confiée au LMS dans le cadre d'un groupement soutenu par géodénergies.

On a proposé, pour la surveillance des cavités salines de stockage d'air comprimé et d'hydrogène, un dispositif basé sur la mesure des ondes stationnaires à l'interface saumure-pétrole provoquées par une chute de bloc, qui ont été observées à Manosque (Géostock) et Big Hill, Texas (stockage stratégique fédéral de pétrole) et a été testé sur maquette. Avec Geostock, le BRGM et Brouard Consulting, on participe à un essai de démonstration soutenu par géodénergies sur des cavités réelles. On a proposé, pour expliquer la formation d'un geyser en tête de puits d'une cavité de production de saumure en Suisse, un mécanisme d'instabilité dont l'origine est la présence d'un gradient de température dans la saumure qui remplit le puits d'accès.

Pour le comportement des cavités de stockage de gaz dans le sel, on a mis en évidence la différence entre fluage transitoire rhéologique (que l'on peut observer sur éprouvette au laboratoire) et géométrique (qui résulte de la lente redistribution des contraintes dans le massif, phénomène qui n'a pas d'équivalent sur une éprouvette de laboratoire). On a proposé pour le comportement thermodynamique des cavités de stockage de gaz des équations qui permettent de dégager les paramètres qui influencent l'apport de chaleur du massif et ceux qui déterminent l'importance des contraintes d'origine thermomécanique dont le rôle est critique dans les détentes rapides qu'exigent les utilisations des cavernes salines inspirées par les besoins de la transition énergétique (stockage d'hydrogène ou d'air comprimé). On a traité le cas particulier d'une éruption (rupture de la tête de puits) et mis en évidence deux régimes, suivant que la vitesse du son est atteinte ou non en tête de puits.

D'un point de vue plus opérationnel, on a proposé des règles pour les pressions maximales dans un stockage de gaz ; l'article a été cosigné par les trois entreprises françaises actives dans ce domaine. Les effets thermiques pendant les essais d'étanchéité ont été étudiés ; on a mis en œuvre une méthode permettant de suivre avec une résolution du centimètre l'évolution d'une interface liquide-liquide à plusieurs centaines de mètres de profondeur pour répondre à une demande de l'administration des mines des Pays-Bas. On a participé avec Géostock et des partenaires britanniques et allemands à un recensement des accidents de perte d'étanchéité des stockages en cavité saline pour le Solution Mining Research Institute, et proposé une analyse de leurs causes.

On a proposé pour décrire la formation des cratères au-dessus de vides karstiques ou de cavités naturelles une distinction entre deux mécanismes, dits du "piston" et du "sablier", dont l'apparition dépend de la nature de la couverture de la cavité. On a participé à une commission mise en place par l'État de Louisiane pour déterminer l'origine et les risques soulevés par le sinkhole de Bayou Corne. Ce thème a suscité deux conférences invitées (AGU et Eurokarst).

Une thèse avec Total, consacrée à une méthode de mesure des très faibles perméabilités en forage, a commencé à la fin de 2015. La méthode consiste à balayer le découvert du puits par l'interface entre deux liquides, l'un peu visqueux, l'autre très visqueux, et, par méthode inverse, à déduire des mesures du débit entré dans la formation la distribution des perméabilités fonction de la profondeur, essentielle pour optimiser la stimulation de la production. La modélisation s'est appuyée sur les résultats d'une maquette et un essai sur un puits réel à 1750 m de profondeur a été réalisé à Marboz (Ain).

2) Multiéchelle et grandes déformations

Structures élancées : on s'est intéressé à différents phénomènes dans des milieux élancés qui ne sont pas pris en compte par la théorie classique des barres ou des poutres. Le but est de proposer des extensions des modèles structuraux classiques permettant ensuite d'étudier ces phénomènes dans un cadre uni-dimensionnel, à l'aide de solutions analytiques ou numériques aisées à mettre en œuvre.

On s'est ainsi intéressé à la modélisation de la *striction des barres* à partir d'un modèle de barre unidimensionnel à deuxième gradient. La striction plastique d'une barre est ramenée à un problème d'élasticité en supposant le chargement proportionnel et monotone, ce qui permet d'introduire un comportement hyper-élastique équivalent. Lorsque la courbe de charge uniaxiale associée à ce potentiel élastique comporte un maximum de la force de traction en fonction de la déformation, il est connu qu'on est conduit à des déformations inhomogènes localisées (striction). Nous avons effectué la réduction dimensionnelle 3d-1d d'un barreau cylindrique fait d'un tel matériau, et avons établi par des méthodes asymptotiques un modèle de barre unidimensionnel dépendant des deux premiers gradients du déplacement. Ce modèle permet de retrouver exactement la charge critique en fonction de la longueur finie du barreau, telle qu'elle avait été calculée sur la base de l'élasticité 3d. Il permet surtout de calculer la branche de solutions bifurquées associées à la localisation progressive du mode instable par striction. Lors de la localisation par striction, l'ensemble du barreau à l'exception de la zone de striction se décharge et l'hypothèse initiale de chargement monotone n'est plus vérifiée : une modification du modèle a permis de rendre compte de la réponse spécifique associée à la décharge élastique, et de montrer que la striction se produit de façon stable dans des barreaux courts qui n'emmagasinent que peu d'énergie élastique, et de façon instable (rupture) dans des barreaux longs. Ce travail a permis également de justifier la formule de Bridgman utilisée de façon routinière en plasticité pour sonder la loi de comportement d'un matériau au-delà du point de Considère, à partir de la mesure expérimentale de la géométrie de la zone en striction.

On s'est aussi intéressé aux instabilités des poutres élastiques soumises à une *forte pré-contrainte inhomogène*. Ce thème était motivé par des expériences faites sur des poutres obtenues par assemblage de deux rubans en polymère, où seul un des rubans était pré-étiré : selon l'intensité de la pré-extension et les caractéristiques géométriques de la section, ces expériences avaient révélé la possibilité d'un mode de flambage soit macroscopique de type Euler-Bernoulli, soit microscopique. Il n'est pas possible de rendre compte de ces observations à partir de la théorie classique des poutres : cette dernière ne peut rendre compte que d'une pré-contrainte infinitésimale et ne peut pas prédire de mode de flambage microscopique. Nous avons étudié ce problème en étudiant les bifurcations d'un barreau prismatique pré-contraint dans le cadre de la théorie de l'élasticité en déformations finies et en 3d. Nous avons montré l'existence d'une bifurcation affectant le nombre critique : le nombre d'onde critique est égal à zéro (instabilité macroscopique) jusqu'à une valeur limite de la pré-contrainte, et devient non nul (instabilité microscopique au-delà). Ces résultats sont en accord avec les expériences initiales, et ont été interprétés sur la base d'un modèle simplifié à deux poutres, dans lequel un paramètre effectif de pré-contrainte induit une bifurcation entre un mode de flambement de type Euler (macroscopique) et un mode de flambage de type poutre sur fondation (microscopique).

Structures complexes multiéchelle.

Cette recherche s'est attaquée à plusieurs types d'applications.

Dans le cadre du travail de thèse de Houda Attia, en collaboration avec l'Ecole Centrale de Paris, le développement d'un modèle de câbles à deux échelles pour la modélisation mécanique de câblés à très

grand nombre de brins a été effectué. Le modèle, développé pour des câbles contenant plusieurs milliers de fils, utilise une notion de macrofibre et de plan séparateur, pour permettre le passage de l'échelle macroscopique du câble à l'échelle élémentaire du brin et la détermination de l'état de contraintes local à cette échelle.

Dans le cadre d'une collaboration avec le CEA/DEN/SEMT, le développement et l'implémentation d'un modèle multiéchelle pour la modélisation de l'évolution à long terme des assemblages combustible en réacteur nucléaire ont été réalisés. Dans le cadre du travail de thèse de Fang Yao, le développement et l'implémentation d'un modèle à deux échelles pour prendre en compte les contacts frottant avec changement de géométrie au niveau des assemblages entre grille et crayon ont été effectués. La thèse de Bertrand Leturq démarrée en septembre 2017 porte quant à elle sur les réductions de modèles thermomécaniques non-linéaires pour l'évaluation des déformations du cœur.

La modélisation du comportement viscoélastique d'un élastomère fortement chargé sous sollicitations multiaxiales a été étudiée dans le cadre des travaux de thèse de D. Jalocha (CIFRE DGA/Safran-Herakles). Ils ont permis de décrire le comportement viscoélastique avec pré-déformations observé lors des essais et de prédire ensuite le comportement dynamique et la réponse fréquentielle des structures complexes incluant ces élastomères (voir DJalocha et al. 2015-2016). L'étude des structures complexes, plus précisément des élastomères chargés s'est poursuivie avec l'étude de la fatigue des joints adhésifs conducteurs dans le cadre de la thèse de Alexandre Jouan (Cifre Schlumberger). On s'est intéressé à l'influence du vieillissement (en particulier son atmosphère et son confinement) sur la prédiction de durée de vie sous sollicitation en fatigue (voir A. Jouan et A. Constantinescu, 2018).

Enfin, un des axes abordés récemment est celui des composants électroniques assemblés sur une carte et dont la complexité a plusieurs origines : la taille, le type d'assemblage, la présence de nombreux matériaux différents et leur nature plus ou moins hétérogène et les chargements thermique et vibratoire subis. Ce sujet est abordé dans le cadre de la thèse de Stéphane Zanella (2015-2018), en contrat Cifre avec Thales co-dirigée par É. Charkaluk et A. Constantinescu. Une première partie de la thèse a consisté à définir un modèle simplifié poutres-plaques de tels composants permettant la réalisation de calculs rapides (rares dans la littérature) mais réclamant une caractérisation des différents matériaux en vue de définir des rigidités en cisaillement, traction, flexion, ... Si les cartes électroniques et les composants sont assez bien caractérisés, il n'en va pas de même pour les assemblages brasés en alliage d'étain du type SAC. Un essai original de cisaillement cyclique de composants électroniques a ainsi été mis au point (charge comprise entre 10 et 50N, déplacements de quelques dizaines de micromètres) permettant de caractériser les joints brasés en statique et sous chargements cycliques de fatigue à différentes températures. Ces essais permettront d'identifier les paramètres des modèles géométriques développés dans un domaine de comportement viscoplastique et un critère de fatigue qui devra rendre compte d'une forte interaction entre fatigue et fluage.

Un dernier travail concerne le développement de méthodes numériques pour structures fortement hétérogènes ou en très grandes déformations sur deux axes :

- Développement en collaboration avec le CEA DAM d'une stratégie de calcul conservatif et robuste de structures en grandes déformations et grandes vitesse. Ceci fait l'objet de l'ANR Snyder, de l'encadrement d'un post doc (Rémy Chauvin) et de la thèse d'Alexis Marboeuf ;
- Développement à l'occasion de séjours de Patrick Le Tallec à l'Université du Texas de nouvelles formulations variationnelles robustes pour l'élasticité hétérogène (Fuentes et al. 2017).

3) Fabrication additive et fiabilité

Fatigue et fiabilité des structures

Les activités s'intéressant à la fatigue et à la fiabilité des structures demeurent un axe important du pôle mais se sont diversifiées au-delà des domaines classiquement abordés jusque-là.

Pour l'estimation de durée de vie, plusieurs critères de fatigue à faible ou à grand nombre de cycles ont été développés ou généralisés par A. Constantinescu, notamment en collaboration avec R. Guerchais ou G. Scalet. Les travaux permettent de décrire le comportement en zone à fort gradient des contraintes et ont été utilisées pour l'estimation de la durée de vie de stents cardiovasculaires.

Une série d'expériences de fatigue à grand nombre des cycles sur des alliages à mémoire de forme a aussi été conduite au laboratoire par A. Constantinescu en collaboration avec G. Scalet et C. Menna (Université de Naples, Federico Due). Les premiers résultats permettent d'étendre le critère de fatigue de Dang-Van-Papodopoulos à ce type de matériaux et de caractériser le comportement du NiTiInol dans le cycle de changement de phase.

Enfin, ont été développés en collaboration avec l'ENSTA et PSA, dans le cadre de la Chaire Citroën, des modèles de fatigue pour des chargements fortement variables en temps et en espace. Ceci a fait l'objet de la thèse de Zepeng Ma, soutenue le 18 décembre 2017 à l'Ecole Polytechnique.

Fabrication additive et fiabilité

L'arrivée en décembre 2016 d'une machine de fabrication additive au LMS (projet DGA-X-ENSTA, machine Mobile BEAM du type DLM, Direct Laser Melting) permet à Y. Balit (2016-2019), dans le cadre de sa thèse co-dirigée par É. Charkaluk et A. Constantinescu et financée par SNCF et DGA, d'étudier l'impact des paramètres du procédé sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un acier inoxydable austénitique, notamment en fatigue et d'aborder la réparation de structures métalliques en acier ou en Inconel. Ce nouveau type de procédé fait en effet apparaître de nombreux problèmes encore largement ouverts dans le domaine de la fatigue : gradients microstructuraux et structuraux, introduits volontairement ou non, contraintes résiduelles, matériaux et structures architecturés, ... Les premiers résultats obtenus montrent ainsi un fort impact des paramètres du procédé sur la microstructure (texture cristallographique et morphologique), sur les contraintes résiduelles liées aux gradients de température, entraînant instabilités et flambage locaux. Ces premiers résultats ainsi que les études déjà réalisées plus généralement sur la prise en compte des gradients en fatigue ont conduit à la définition de la thèse de Camille Guevenoux (2017-2020), co-dirigée par É. Charkaluk et A. Constantinescu, en contrat Cifre avec SafranTech qui va s'intéresser au cas des structures en alliage de titane TA6V fabriquées et/ou réparées par DLM et soumises cette fois à des relativement hautes température (600-800°C). L'accent sera donc mis sur la caractérisation et la modélisation de l'interface liée à une réparation dans un calcul de structure complexe. De même, la thèse de Nikolai Khailov (2017-2020) co-dirigée par É. Charkaluk et A. Constantinescu porte sur la caractérisation et la fatigue de structures associant milieux architecturés et milieux massifs sous sollicitations cycliques à température variable. Il s'agira ici de pouvoir modéliser une telle structure multimatériaux sous chargements thermomécaniques, en particulier dans les zones d'interface.

Le dernier axe abordé est l'extension des concepts d'adaptation et des outils associés à ceux-ci (calculs stationnaires ou cycliques directs) au dimensionnement de structures sous sollicitations électriques, magnétiques, thermiques et mécaniques couplées et variables. L'application visée concerne les moteurs électriques et c'est l'objet de la thèse de Nicolas Hanappier (2017-2020) co-dirigée par É. Charkaluk et N. Triantafyllidis et financée dans le cadre de la chaire PSA.

En parallèle avec les procédés de fabrication mécanique de matériaux métalliques, des problématiques liées aux structures en matériaux polymères ont également été abordées. La lithographie à deux photons est étudiée par A. Constantinescu dans le cadre du projet ANR MechNanoTruss en collaboration avec l'équipe du Prof. Chiara Daraio (ETH Zurich Suisse / Caltech, Pasadena, USA). Des mesures expérimentales et des simulations numériques sur des micro-lattices ont permis de mettre en évidence l'effet de la topologie de la structure, ainsi que de la densité sur les propriétés viscoélastiques macroscopiques de la structure (S. Krödel et al. 2016). Plus précisément, après une densité relative de 50% on remarque que l'énergie dissipée dans la microlattice est supérieure à celle d'un matériau de volume équivalent, ce qui permet d'imaginer la fabrication de matériaux architecturés possédant de meilleures propriétés d'absorption. Pour des structures minces, le contrôle des contraintes résiduelles de fabrication a permis l'impression de structures auto-pliables, i.e. boules en forme de fleurs de lotus, etc. (A. Bauhofer et al. 2017).

Afin de mieux maîtriser la conception de structures microarchitecturées, on a étudié dans le cadre du postdoctorat de G. Nika (ANR MechNanoTruss) les algorithmes d'optimisation topologique de forme. Les premiers résultats proposent des structures multicouches auxétiques, i.e. à coefficient apparent de Poisson imposés. La fabrication et la caractérisation expérimentale de ces structures sont en cours.

4) Vibration et dynamique des structures

Deux sujets ont été abordés : le rayonnement des enceintes acoustiques (projet ANR Edison3D) et la vibration des tables d'harmonie de piano (projet ANR MAESSTRO dont X. Boutillon est le coordinateur). Un des objectifs du projet ANR Edison 3D est de contrôler la directionnalité du rayonnement des enceintes acoustiques et barres de son en vue d'applications à la réalité virtuelle (home cinema par exemple). Deux modèles analytiques du rayonnement ont été développés au cours de la thèse de V. Roggerone, en coopération avec É. Corteel, coordinateur du projet (*sonic emotion Labs*, puis *L-acoustics*) : l'un basé sur l'approximation sphéroïdale de la forme de l'enceinte, l'autre sur la description de la diffraction par les arêtes de l'enceinte du champ émis par le haut-parleur. L'ensemble des deux modèles fonctionne à présent avec succès et efficacité sur une large bande de fréquence. L'intérêt espéré de la description analytique du rayonnement, par rapport à sa simulation numérique, est de faciliter le contrôle paramétrique de la directionnalité du rayonnement.

Le projet ANR MAESSTRO (coordonné par X. Boutillon) porte en particulier sur la vibration des tables d'harmonie de piano. L'étude sur la localisation des vibrations par la distribution irrégulière des raidisseurs, menée dans le post-doctorat de G. Lefebvre en coopération avec M. Filoche (PMC, École polytechnique) n'a pas été conclusive. Succès inattendu, cette recherche a permis de formuler une hypothèse intéressante sur les déformées modales d'une structure régulièrement raidie. Lorsqu'on représente ces déformées modales dans l'espace réciproque (espace des k , après transformée de Fourier spatiale) il apparaît que les composantes principales (au plan énergétique) se répartissent sur n très petit nombre de branches de dispersion, facilement calculables pour une telle structure, et ce, même si la fréquence modale concernée se situe en dehors du domaine d'existence de certaines des branches de dispersion. Ce résultat est potentiellement intéressant pour évaluer rapidement les facteurs de rayonnement de telles structures.

Les autres aspects de MAESSTRO portent sur la caractérisation des plaques en matériaux composites, notamment sous l'angle de leur amortissement propre, en collaboration avec le laboratoire Navier (thèse de P. Margerit, en collaboration avec A. Lebé et J.-F. Caron), et sur la mise au point d'un logiciel de CAO sonore, en collaboration avec B. Cotté (IMSIA). Ce logiciel en cours de développement met en particulier à profit le modèle très synthétique de vibration de la table d'harmonie de piano, mis au point avec K. Ege (cf. article de 2013) et valable dans l'essentiel de la plage de fréquence utile du piano.

5) Méthodes inverses

Le laboratoire dispose d'une installation aux barres d'Hopkinson pour faire des essais en dynamique sur une plage importante de vitesses de déformation (du quasi-statique grâce à une sollicitation par vérin et des techniques de déconvolution jusqu'à 50 000 s⁻¹ grâce à des essais d'impact direct sur des barres de faible diamètre en passant par des essais classiques utilisant deux barres). Plusieurs aspects liés à l'identification de modèles matériaux sont développés au travers de deux principaux projets.

Le premier projet se place dans le cadre de la thèse d'Anthony Janin (CIFRE Safran Composite, encadrée par A. Constantinescu et D. Weisz-Patrault). L'objectif est de développer une méthodologie de caractérisation de joint collé en dynamique sous sollicitations multiaxiales. Deux aspects expérimentaux émergent de cette problématique. D'abord le design d'une nouvelle éprouvette permettant d'obtenir différentes sollicitations mécaniques d'un assemblage collé lors d'un test aux barres d'Hopkinson. Une éprouvette dodécahédrique sandwich a été développée pour permettre trois angles possibles entre la direction du joint et la direction de sollicitation des barres. Les états de contraintes correspondants sont bien distincts les uns des autres et

multiaxiaux (Janin et al. 2018). Le second aspect expérimental tient à la mesure proprement dite. Les barres d'Hopkinson permettent d'avoir accès à des quantités globales telles que la force et le déplacement au droit de l'échantillon. Cependant la complexité géométrique de l'éprouvette interdit d'interpréter directement ces mesures. Le comportement du joint (et non de l'éprouvette) est extrait grâce à une méthode inverse numérique nécessitant la simulation fine des essais. Pour faciliter cette méthode inverse il est nécessaire d'ajouter des mesures plus locales qui soient très sensibles au comportement du joint. Ainsi des mesures par corrélation digitale d'image ont été faites dans la zone centrale du joint. Pour cela une caméra rapide a été utilisée ainsi qu'un éclairage adéquat pour permettre l'acquisition de suffisamment d'images pendant l'essai dont la durée n'excède pas 300 μ s. L'identification elle-même s'appuie sur une méthode classique de mise à jour d'un modèle élément finis, c'est-à-dire la minimisation (sur l'espace des paramètres matériaux à identifier) d'une distance entre les mesures et la simulation numérique. Pour ce faire un modèle numérique efficace du point de vue du temps de calcul et suffisamment fiable est nécessaire. La modélisation complète et en 3D de l'essai est inenvisageable pour ce type d'analyse (car les barres sont très longues) et une modélisation trop simplifiée ne prenant en compte que l'éprouvette pose des problèmes de réflexion d'ondes aux surfaces libres (artificielles car en réalité il s'agit de contacts avec les barres) lorsque que les signaux imposés à l'éprouvette ne sont pas en parfaite corrélation avec la propagation numérique des ondes. La solution qui a été préférée est hybride et consiste à modéliser en 3D une petite portion des barres ainsi que l'éprouvette et d'éviter les problèmes de réflexion d'onde irréaliste en poursuivant le reste des barres par des éléments 1D beaucoup moins coûteux en temps de calcul. De cette manière on n'introduit pas de surfaces libres artificielles mais seulement une transition 3D/1D qui ne dégrade pas la solution. L'identification d'un modèle du joint et d'une surface de rupture dans l'espace des contraintes principales a été rendue possible par le développement de cette méthodologie.

Le second projet associé à l'identification en dynamique se place dans le cadre du post-doctorat de Charles Francart (CEA, encadré par D. Weisz-Patrault). Il s'agit d'identifier des comportements de tout type de matériaux dans un cadre probabiliste bayésien. L'identification elle-même est une inférence bayésienne classique, c'est-à-dire que le modèle de comportement est identifié comme une probabilité a posteriori sachant les données des essais réalisés, en partant de probabilités a priori, correspondant aux valeurs usuelles pour le type de matériau considéré. Ainsi, des modèles de comportement ayant un grand nombre de paramètres sont identifiés en effectuant une série d'essais venant corriger la connaissance a priori du modèle. Ce cadre probabiliste permet entre autre d'exploiter ces modèles de comportement dans des simulations de risque. Le projet vise à enrichir ce point de vue probabiliste en introduisant dans le dépouillement des essais aux barres d'Hopkinson l'incertitude que l'on a sur un certain nombre de grandeurs physiques nécessaires à l'interprétation des mesures. En effet, le dispositif expérimental n'est que partiellement connu, par exemple, la célérité des ondes dans les barres, leur module d'Young, la position des jauges, la dimension de l'échantillon etc... ont une influence sur le comportement identifié de chaque essai et ne sont connus qu'à une certaine marge d'erreur près. A cela s'ajoute les aléas de la variabilité des matériaux (en fonction du sens de laminage, du lot etc...) qui est identifiée grâce à une approche bayésienne hiérarchique nécessitant plusieurs essais sur différents échantillons. L'approche hiérarchique consiste à supposer que les échantillons sont des tirages aléatoires parmi l'ensemble des échantillons possibles d'un matériau. Ainsi une hyper-variable aléatoire (à déterminer) contrôle la variabilité matériaux. La vision Bayésienne permet in fine d'identifier des distributions postérieures de probabilité pour les coefficients matériaux.

6) Méthodes inverse rapides (exploitation en temps réel).

D. Weisz-Patrault a contribué au développement de plusieurs solutions efficaces pour l'estimation des contraintes de contact dans le procédé de laminage à chaud et à froid. Ces méthodes sont actuellement utilisées dans un contexte industriel et leur développement ont fait l'objet d'un contrat de recherche avec ArcelorMittal et d'une collaboration dans un projet européen.

L'idée de ces travaux vient du constat que les études par simulation numérique lourde (couplant le comportement visco-élasto-plastique de la tôle (produit) et le comportement élastique des cylindres (outils), ainsi que les aspects thermiques, changement de phase etc....) ont peu de contrepartie expérimentale. Par

ailleurs on cherche à s'orienter vers des calculs rapides permettant d'évaluer en temps réel pendant le procédé les conditions de contact entre les outils et le produit pour mieux agir sur les paramètres de contrôle et ainsi mieux maîtriser l'état de contraintes résiduelles et la microstructure. Cette optique générale nous a conduits à proposer des méthodes indirectes de mesure pour ne pas perturber les contacts en question. L'idée majeure est de travailler sur les cylindres et non directement sur l'interaction entre ces derniers et la tôle qui a un comportement fortement non-linéaire et sur laquelle il est difficile de mesurer des grandeurs. En effet le cylindre est un objet particulièrement simple, linéaire isotrope dont les conditions aux limites nous renseignent grandement sur le contact (pression et cisaillement ainsi que les flux de chaleur). Ces travaux obtiennent donc des informations sur une interaction fortement non linéaire (outils/produit) alors même que l'objet d'étude est simplement linéaire. Il s'agit de mesurer des grandeurs telles que la température ou encore les déformations à l'intérieur de l'outil cylindrique et par méthode inverse d'en déduire les conditions de contact responsables de ces champs. Ainsi, plusieurs méthodes inverses reposant sur des calculs semi-analytiques ont été publiées (contacts mécaniques, thermique, couplage thermo-mécanique en 2D et en 3D). Des mesures en conditions industrielles ont été rendues possible par l'insertion de fibres optiques et d'un thermocouple sous la surface du cylindre pour mesure les déformations et la température. L'exploitation de ces mesures a montré la faisabilité de l'évaluation inverse des conditions de contact en temps réel.

Ce type de travaux a été poursuivi sur d'autres éléments de la chaîne de mise en forme par laminage. Par exemple, une méthode inverse semi-analytique a été développée et permet d'identifier les contraintes de traction/compression résiduelles dans les tôles grâce à une mesure de déplacement dans un cylindre troué sur lequel la tôle est en déflexion. D'autres méthodes inverses semi-analytiques sont en préparation pour permettre de contrôler des chauffages par induction grâce à un couplage thermique/mécanique/électro-magnétique dans le cylindre de laminage. L'importance de ces travaux tient aux applications industrielles de contrôle, mais aussi et surtout aux outils d'analyse permettant d'évaluer les conditions essentielles dans lesquelles se forment les microstructures et les contraintes résiduelles.

SWOT Pôle Structures - Eléments d'analyse

<p>Points forts</p> <p>Chercheurs en modélisation et simulation avec compétences expérimentales</p> <p>Richesse des sujets</p> <p>Liens forts avec l'enseignement (EP et masters)</p> <p>Collaborations fortes avec le monde industriel et soutien des chaires : PSA, Arkema et de la DGA</p> <p>Collaborations internationales actives</p>	<p>Points faibles</p> <p>Difficulté de recrutement sur la thématique structures géotechniques et dynamique rapide</p> <p>Difficulté de la pérennisation des développements : numériques dans un code / plateforme unique,</p> <p>Difficulté de valorisation des développements expérimentaux</p>
<p>Opportunités</p> <p>Développement des procédés d'impression 3D métallique ou polymère au LMS</p> <p>Participation aux projets d'impression 3D sur le plateau Paris-Saclay</p> <p>Développement de la thématique micro-structures architecturées</p> <p>Collaborations multiples avec les pôles matériaux et multiphysiques</p> <p>Développement des nouveaux moyens d'essais mécaniques à petite échelle</p> <p>Rapprochement avec d'autres entités mécaniques dans le nouveau bâtiment</p>	<p>Risques</p> <p>Le déménagement dans le nouveau bâtiment : délais pour essais, coûts supplémentaires</p> <p>Difficulté de maintenir un spectre large de thématiques</p> <p>Evolution futures des thématique structures géotechniques et dynamique rapide</p> <p>Deux départs en retraite dans le courant du contrat</p>

Pôle Mécanique multidisciplinaire

CHERCHEURS

Basile Audoly (DR CNRS & PA EP, depuis 01/01/2016), Laurence Bodelot (MdC EP), Xavier Boutillon (DR CNRS), Kostas Danas (CR CNRS & PCC EP), Giuseppe Geymonat (DR émérite CNRS), Michel Jabbour (PA EP), Patrick Le Tallec (Prof. EP), Jean-Jacques Marigo (Prof. EP), Lev Truskinovsky (DR CNRS, départ 2016), Daniel Weisz-Patrault (CR CNRS), Nick Triantafyllidis (DR CNRS et Prof EP)

Post-doctorants restés 12 mois ou plus

G. Sfyris (2012 – 2014), K. Haldar (2015 –2017), V. Dabade (2018 – now), G. Tarentino (2016 – 2018)

Domaine d'activité

Le Pôle « Mécanique multidisciplinaire » 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, mécanique-électronique, biologiques, et leurs multiples applications aux actionneurs, cellules photovoltaïques, biomécanique des cellules et des tissus, pour citer juste quelques exemples. Les aspects multidisciplinaires ont été développés dans les axes suivants.

Le premier axe de recherche porte sur les couplages électro- et magnéto-mécaniques. Il 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. Une autre partie des travaux porte sur les couplages entre propriétés mécaniques et électroniques des solides et matériaux nématiques. Ceci conduit à toute une gamme d'applications industrielles allant des systèmes photovoltaïques et cristaux liquides à la fabrication des films minces en électronique.

L'objectif du deuxième 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 et à l'absorption des médicaments. Cela inclut des aspects de mécano transduction, d'élasticité active des muscles, de motilité cellulaire, de segmentation vertébrée ou encore de poroélasticité finie couplée avec la diffusion des solutés.

Le troisième axe concerne la plasticité et l'endommagement, avec l'étude des interactions entre défauts multiples ainsi que celle des effets thermiques. 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).

Production scientifique :

Durant la période sur laquelle porte l'évaluation, les membres du pôle ont été auteurs ou co-auteurs de **72 articles dans des revues à comité de lecture. 9 thèses** ont été soutenues dans le cadre du pôle.

Collaborations

Le pôle entretient de nombreuses collaborations industrielles (CEA, Dupont de Nemours, PSA, Michelin, BD Medical). Il est aussi très présent à l'international, avec des collaborations de longue durée avec Cornell, Caltech, Illinois, LSU et UT Austin aux USA et le Politecnico de Milan en Europe.

Principaux résultats juillet 2013 - juin 2018

1) Matériaux et problèmes en multi-physique

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 semi-conducteurs 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 gommes 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, proposée par Kankanala et Triantafyllidis, Tobias POSSINGER a soutenu sa thèse (en co-tutelle avec le CEA) en Juin 2015. Basé sur des essais couplés (en sollicitation mécanique dans un champ magnétique) il a proposé une fonction de densité d'énergie qui est capable de reproduire l'aimantation expérimentalement mesurée et la magnétostriction.

Son modèle macroscopique 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. Les travaux continuent avec un autre doctorant, J. P. Voropaieff, qui modélise le problème aux limites de l'échantillon dans le champ magnétique basé sur un logiciel aux éléments finis qui a été développé avec l'aide de K. Danas. Les essais couplés perfectionnés, mis au point par L. Bodelot, ont nécessité une nouvelle forme d'échantillon qui a été breveté.

Les applications dans le domaine des MRE font l'objet d'une ERC (Magneto), obtenu par K. Danas, qui porte sur le design des actionneurs magnétorhéologiques. A l'aide d'un chargement mécanique en compression on arrive à activer des instabilités magnétiques des couches MRE minces avec des champs magnétiques assez faibles (thèse de E. Psara). De surcroît, l'utilisation des particules de fer dur, des différents champs magnétiques pendant la solidification etc. ouvrent la possibilité à toute une gamme d'actionneurs qui renforcent le couplage magnétomécanique en réduisant l'intensité du champ magnétique requis.

Élastomères nématiques et cristaux liquides

Les élastomères nématiques sont des solides formés par les chaînes polymères de réticulation qui incluent des molécules de cristaux liquides. L'interaction entre l'élasticité du polymère du réseau et l'alignement des molécules de cristaux liquides conduit à des propriétés particulières qui font des élastomères nématiques un matériau prometteur pour des applications comme les actionneurs souples rapides et les 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 K. Danas, G. Sfyris et G. Wen. La théorie est adaptée aux cristaux liquides nématiques et plus précisément 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 (Twisted Nematic Device) qui est la cellule fondamentale des écrans aux cristaux liquides.

Couplages multiphysiques : mécanique-électrique-électronique

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. Dennis LANGE a soutenu sa thèse le 4 Septembre 2015 en étudiant la résistivité des semi-conducteurs en couche mince sous contrainte. Le travail sur la modélisation continue du couplage mécanique-électrique-électronique des semi-conducteurs a considérablement avancé avec la collaboration de M. Jabbour et d'un nouveau doctorant L. Guin en s'appuyant sur la thermodynamique de ces systèmes dissipatifs, avec application aux jonctions p-n sous contrainte. Une importante composante expérimentale est mise en place pour mesurer ces effets.

Un autre sujet de recherche dans le domaine des interactions mécanique-électronique porte sur la fabrication des films minces par déposition de vapeurs ou épitaxie moléculaire. La croissance de la surface cristalline par ces méthodes se fait par des marches qui se propagent d'une manière uniforme. Or, suivant les conditions de dépôt, des instabilités peuvent détruire l'uniformité de croissance des marches, phénomène très important à l'industrie électronique. Les travaux récents de L. Guin, en collaboration avec L. Shaabani de Ladhyx, mettent en évidence des nouveaux phénomènes, dus aux influences élastiques, qui changent complètement les idées dominantes dans ce domaine.

Une nouvelle initiative a commencé en Septembre 2017 sur la modélisation simultanée mécanique-électromagnétique des moteurs électriques, motivée par l'intérêt de l'industrie auto motivé pour des solutions innovantes de traction électrique. Pour concevoir et optimiser de nouveaux types de moteur il est important de calculer pas simplement les champs magnétiques et courants électriques mais aussi les contraintes dans le stator et le rotor. Or, ces calculs se font séparément en solvant deux problèmes différents (équations de Maxwell et mouvement mécanique), méthode qui ne prend pas en compte correctement les couplages et non linéarités induites qui seront importants dans les études de fiabilité (flambage des structures allégées, hausse de température en cas des court-circuits, phénomènes de saturation magnétique etc.). La thèse de N. Hanappier, co-encadrée par E. Charkaluk et N. Triantafyllidis, avec le soutien de la Chaire PSA, étudie ces problèmes en développant des formulations variationnelles couplées thermomécanique et magnétoélectrique qui seront à la base des méthodes numériques cohérentes.

Couplages multiphysiques : mécanique neutronique

Dans le cadre de la thèse d'Alexandre Targa dirigée par P. Le Tallec, une modélisation multiphysique d'un cœur de réacteur en situation accidentelle a été mise en place, couplant neutronique, thermohydraulique, et thermomécanique des crayons de combustible. Les couplages forts se font par l'évolution du champ de température, qui par effet Doppler affecte la neutronique et en conséquence la production de chaleur, et qui est fortement dépendante de l'état mécanique du fluide caloporteur et des crayons de combustible.

2) Mécanique pour le médical et l'humain

Mécanique pour le médical

Dans le cadre de la thèse de Claire Dupont, dirigée par P. Le Tallec, une simulation des déformations de microcapsules en écoulements cisailés a été mise en place avec prise en compte de géométries tridimensionnelles complexes et analyse des phénomènes de plissement des capsules induits par l'écoulement. Le modèle combine résistance à la flexion des membranes de capsules et comportement membranaire fortement non linéaire et adoucissant. Une méthode numérique originale a été développée avec l'INRIA et l'UTC (Compiègne). Le travail a débouché début 2018 sur une ERC portée par Anne Virginie Salsac à laquelle collabore P. Le Tallec.

Un nouveau projet a démarré en 2017 en collaboration entre B&D (these CIFRE de L. GIL) et M. Jabbour et N. Triantafyllidis qui porte sur la modélisation de la diffusion d'un fluide dans des tissus subcutanés. Les résultats de cette étude devront permettre de prévoir et de contrôler la diffusion de substances médicamenteuses dans les différentes couches cutanées et musculaires, en fonction des paramètres d'injection tels que le volume de

fluide injecté, la pression imposée par le système d'injection, la géométrie de l'aiguille hypodermique, les caractéristiques physiques du fluide... L'analyse effectuée devra également tenir compte de la dimension temporelle du phénomène de manière à rester cohérente avec les applications médicales. Ce projet comporte une partie théorique de modélisation ainsi qu'une partie expérimentale et numérique. Jusqu'à présent, les modèles utilisés pour caractériser la diffusion d'un fluide lors d'une injection ne prennent pas en compte les grandes déformations des tissus biologiques. De fait, ces modèles ne sont pas en mesure de traiter la baisse de diffusivité due à la déformation des cellules, qui est engendrée par l'augmentation du volume de fluide inter cellulaire (fluide injecté). Il est ainsi nécessaire de proposer un modèle mécanique adapté à ce couplage, qui permet de comprendre et de prévoir la diffusion d'un fluide newtonien / non-newtonien au sein d'une matrice déformable. Le résultat de cette étude devra être en mesure de retranscrire la mécanique fondamentale du modèle adopté, tout en restant cohérent avec les observations et les modèles biologiques connus. Il est également indispensable qu'il soit formulé de façon à être utilisable en pratique. Le respect de ces contraintes nécessite une collaboration importante entre les acteurs industriels et académiques de ce projet.

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.

L'étude de la touche de piano menée par X. Boutillon avec J. Lozada (Laboratoire d'Interfaces Sensorielles et Ambiantes, CEA-LIST) vise à élaborer un nouveau type de clavier semi-actif pour les synthétiseurs musicaux dont le retour d'effort sur les doigts soit identique à celui du piano traditionnel (contrôle haptique). Une étape-clé consiste en la simulation numérique de la force ressentie par le pianiste pour tout mouvement qu'il impose à la touche. La dynamique de la touche de piano est non-régulière et sa simulation a été réalisée avec succès par A. Thorin (doctorant) grâce à une coopération avec le Laboratoire de Simulation Interactive (CEA-LIST).

3) Plasticité et endommagement avec différents couplages

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.

Approches mixtes numérique/analytique pour des problèmes non-linéaires et multiphysiques.

Un premier axe a concerné l'étude de la plasticité avec changement de phase par D. Weisz Patraut. Cela intègre une modélisation théorique des transitions de phase en régime plastique par calculs d'homogénéisation et en s'appuyant sur des méthodes énergétiques. Une première étude a concerné la rotation des grains pendant la transformation de phase (stage de master de Joffrey Bluthé) et une méthode énergétique multiéchelle se met en place pour développer un modèle macroscopique polycristallin avec transformation de phase (thèse de Sofia Sakout). Cette partie s'est accompagné d'études expérimentales par dilatométrie sous charge. Elle met en jeu de nombreux couplages (thermique, transformation de phase, mécanique, contact, grandes transformations) avec pour enjeu l'évaluation des contraintes résiduelles. Elle débouche sur de nombreuses applications

- a. Applications aux procédés de refroidissement des aciers sur la table de sortie (stage de master de Thomas Koedinger)
- b. Applications à l'enroulement des tôles.
- c. Applications au refroidissement des enroulements.
- d. Applications à l'effondrement des enroulements (stage de master de Maxime Gantier).

J.J. Marigo et ses doctorants ont étudié de leur côté le 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.

Modélisation de l'endommagement

Dans le projet de modélisation de la fracturation hydraulique à partir de modèles d'endommagement à gradient (thèse de Erwan Tanné en collaboration avec Blaise Bourdin (professeur au LSU) le travail de thèse comportait trois volets: (i) utilisation des modes d'endommagement fragiles à gradient pour prédire la nucléation des fissures dans des structures saines; (ii) l'implémentation et le test de modèles d'endommagement à gradient couplés à la plasticité pour prédire la rupture ductile; (iii) des applications à la fracturation hydraulique. Pour les deux premiers volets, la confrontation des simulations numériques avec des résultats expérimentaux est remarquable, ce qui démontre la capacité des modèles d'endommagement à gradient à prédire tout le processus de rupture (de la nucléation à la rupture finale), en quasi-statique, avec ou sans plasticité.

Dans le projet de modélisation de l'endommagement non local dans un milieu viscoélastique et application aux procédés de démoulage et de moulage (thèse débuté en octobre 2015 avec soutenance est prévue en octobre 2018), l'objectif est d'étendre l'approche variationnelle basée sur les domaines d'endommagement à gradient au cadre des grandes déformations avec effet visqueux. De plus, il s'agit d'adapter les modèles d'endommagement au cas des matériaux quasi-incompressibles afin d'avoir des critères d'amorçage qui prennent compte de la partie sphérique des contraintes. Le modèle étendu a été implémenté et testé tout d'abord dans le logiciel libre FENICS, puis dans le code de Michelin.

Modélisation multiéchelle par méthode asymptotique

Dans le projet : Modélisation multiéchelle par méthode asymptotique et applications aux métamatériaux animé par J.J. Marigo, l'activité a débuté en 2016 en collaboration avec plusieurs collègues venus de domaines différents (acoustique, électromagnétisme, géophysique, ...). Le dénominateur commun de tous ces travaux est l'utilisation de méthodes asymptotiques (telle la méthode des développements asymptotiques raccordés) pour traiter des modèles mathématiques comportant un ou plusieurs petits paramètres. Ces paramètres peuvent être d'origine géométrique et traduisent la présence de plusieurs échelles de longueur, mais aussi de nature matérielles (constantes élastiques, célérités, masses volumiques, ...) lorsque les matériaux constitutifs présentent de forts contrastes. Les équations étudiées à ce jour sont celles de l'acoustique, de l'élastodynamique, de l'électromagnétisme ou de la houle. Les hétérogénéités peuvent être réparties périodiquement en volume ou en surface. Dans le premier cas il s'agit de construire le comportement effectif du milieu, alors que dans le deuxième il s'agit de construire les conditions de transmission effectives à travers la surface où sont localisées les hétérogénéités. En fait on ne peut pas en général se limiter au terme dominant mais on a besoin d'aller explorer les ordres supérieurs dans les développements asymptotiques. Ces méthodes sont particulièrement bien adaptées pour étudier les principaux phénomènes caractérisant la dynamique des méta-matériaux (résonance de Mie, résonance de Minnaert, cape d'invisibilité, déviation des ondes, ...). En deux ans cette activité s'est traduite par la publication une dizaine d'articles dans des revues internationales et par deux chapitres d'ouvrage. Plusieurs autres applications sont à l'étude et la liste des partenaires potentiels croît rapidement.

Dans le même ordre d'idée, citons les travaux de G. Geymonat sur l'homogénéisation des structures à matériaux composites, sur l'homogénéisation des interfaces, et sur le développement de modèles pour matériaux intelligents en présence d'effets thermiques.

SWOT Pôle Multidisciplinaire

<p>Points forts</p> <p>Nouvelles thématiques à l'interface de mécanique des solides, électromagnétisme, mécanique et électronique.</p> <p>Chercheurs avec compétences en expérimentation et modélisation/simulation.</p> <p>Liens forts avec l'enseignement (EP et M4S)</p> <p>Collaborations avec des autres laboratoires de l'Ecole (LPICM, 3 thèses déjà en cotutelle)</p> <p>Reconnaissance/Visibilité : ERC et Prix</p> <p>Rayonnement international</p> <p>Soutien des partenaires européens (ERC) et industriels (Chaire PSA, BD médical)</p>	<p>Points faibles</p> <p>Départ proche de deux professeurs; remplacement dans les plus courts délais par l'EP impératif pour garder le niveau d'activité</p> <p>Manque d'ingénieur système pour subvenir aux besoins du calcul intensif du pole.</p>
<p>Opportunités</p> <p>Développement des projets communs avec les laboratoires voisins en physique et matière condensée</p> <p>Utilisation de nouveaux procédés (impression 3D) pour le développement des matériaux magnétorhéologiques architecturés</p> <p>Nouvelle thématique des moteurs électriques (Chaire PSA)</p>	<p>Risques</p> <p>Difficulté à acquérir (coût) et maintenir (personnel) des moyens expérimentaux adaptés aux différents matériaux étudiés.</p> <p>Le déménagement vers le pôle Méca va fortement ralentir l'activité expérimentale et pourrait mettre en difficultés doctorants/post-docs</p>

Pôle Mécanique du Vivant/ Equipe projet M3disim

Chercheurs ou enseignants-chercheurs

Jean-Marc Allain, (PCC Ecole Polytechnique), Radomir Chabiniok (médecin et CR INRIA sous contrat), Dominique Chapelle (DR INRIA), Martin Genet, (MdC Ecole Polytechnique), Sébastien Imperiale (CR INRIA), Patrick Le Tallec (Prof EP), Philippe Moireau, (DR INRIA détaché Corps des Mines), Fabrice Vallée, (médecin à Lariboisière)

Ingénieur de Recherche : Gautier Bureau (jusqu'à février 2018)

Domaine d'activité

Les recherches menées dans l'équipe M3DISIM ont une perspective méthodologique plutôt globale orientée vers la biomécanique, incluant la modélisation et l'analyse mathématique, les problèmes inverses issus du couplage entre modèle données et tests expérimentaux, ainsi que la formulation et l'analyse de procédures numériques efficaces et fiables. Ce programme cherche aussi à démontrer l'efficacité et la pertinence de ces méthodes dans des applications cliniques réelles par des études de preuve de concept menées dans le cadre de diverses collaborations. L'originalité de l'approche réside dans cette combinaison unique de préoccupations et de compétences à la croisée des mathématiques appliquées et de la mécanique.

Sur la modélisation mécanique et mathématique multi-échelle, la cible principale concerne la modélisation mécanique des tissus biologiques, et en particulier du comportement actif des muscles. Une des pierres angulaires de l'approche de modélisation suivie réside dans les considérations énergétiques (bilans et échanges) qui sont cruciales pour modéliser adéquatement la physiologie musculaire en prenant en compte les différents types de couplages multi-physiques et biochimiques sous-jacents. La réalisation de ces objectifs nécessite également des stratégies adéquates d'analyse mathématique et de discrétisation numérique. En outre, d'autres outils mathématiques sont instrumentaux dans notre programme, en particulier dans le domaine des méthodes asymptotiques, telles que l'homogénéisation, les méthodes de physique statistique et la réduction dimensionnelle, toutes considérées conjointement avec l'analyse numérique.

En termes d'interaction modèle-données, un défi majeur dans le contexte de la modélisation biomécanique consiste à utiliser la grande quantité de données disponibles sur le système pour contourner l'absence de vérité absolue de la modélisation, puisque chaque système considéré est en fait spécifique au patient, avec des conditions non standard associées à une maladie. Dans ce contexte, on étudie les stratégies d'assimilation des données avec un intérêt particulier pour les applications cardiaques. Il s'agit de développer des stratégies originales basées sur des méthodes séquentielles, également connues sous le nom de théorie des observateurs. Enfin, la confrontation des résultats de simulation numérique avec des données expérimentales est évidemment une étape clé pour la validation des modèles, et cet objectif est poursuivi à la fois en interne et en collaboration avec des partenaires dotés d'une expertise et d'installations expérimentales de pointe. De plus, étant donné les difficultés et les limites des études expérimentales ex vivo et in vivo, la validation du modèle est aussi recherchée directement au niveau de l'organe (cœur) ou du système (par exemple cardiovasculaire) sur la base de données cliniques.

Animation scientifique

Le pôle mécanique du vivant s'est structuré au travers de la mise en place de l'équipe-projet commune Inria M3DISIM, officiellement créée en juin 2016. Les chercheurs, tous situés dans un même lieu au bâtiment Turing, sont incités à collaborer étroitement, et l'entité collective que constitue l'équipe est évaluée tous les 4 ans selon la procédure Inria (évaluation très positive réalisée fin 2017). L'équipe a mis en place une réunion d'agenda hebdomadaire le lundi matin, et des réunions de permanents tous les mois. Par ailleurs, les membres de l'équipe coorganisent deux séminaires, l'un mensuel en biomécanique et l'autre trimestriel autour du calcul scientifique. Enfin, un séminaire interne a lieu tous les mois et les doctorants organisent un mini-séminaire informel chaque semaine.

Production scientifique

Durant la période sur laquelle porte l'évaluation, les membres du pôle ont été auteurs ou coauteurs de **50 articles dans des revues à comité de lecture**, sachant que ce pôle ne s'est véritablement constitué et structuré qu'en 2016. 1 HDR a été soutenue par P. Moireau (2016), ainsi que **3 thèses** soutenues dans le cadre du pôle pour 8 en cours montrant la montée en charge du pôle.

Collaborations

Au sein de l'Inria, l'équipe a une fructueuse collaboration méthodologique avec l'équipe-projet Reo sur l'estimation des problèmes multi-physiques (électro-mécanique ou interaction fluide-structure). Nous collaborons également avec le projet Mamba sur les stratégies d'assimilation des données pour les modèles de dynamique des populations. S. Imperiale, P. Moireau et A. Tonnoir collaborent aussi avec S. Fliss du projet Poems (propagation des ondes) et K. Ramdani du projet Sphinx (contrôle des ondes et de l'interaction fluide-structure) sur les problèmes directs et inverses en propagation d'ondes avec application en élastographie. L'équipe a également co-développé la bibliothèque d'assimilation de données Verdandi avec V. Mallet (Inria Ange). La bibliothèque a été typiquement utilisée par l'équipe de projet Asclepios pour l'estimation des paramètres en mécanique cardiaque [MDS + 13], et maintenant par l'équipe de projet Carmem pour l'estimation d'état et de paramètres en électrophysiologie utilisant des données d'isochrones de dépolarisation.

Sur l'Ecole Polytechnique, il y a une forte collaboration avec l'équipe de M.-C. Schanne-Klein au Laboratoire d'Optique et Biosciences (LOB, Ecole Polytechnique, CNRS, INSERM), sur le développement du microscope optique utilisée pour les observations in situ de tissus biologiques.

En extérieur, l'équipe collabore avec l'ETH-Zurich (groupe du Prof. Kozerke, spécialisé en IRM cardiaque) et l'Institut Langevin (M. Pernot pour l'élastographie cardiaque transitoire, et M. Fink / R.-K. Ing pour l'imagerie de surface acoustique sans contact). En outre, nous avons des discussions approfondies avec le laboratoire de physiologie de Florence (V. Lombardi et ses collègues, experts dans les tests expérimentaux des muscles dans des conditions physiologiques) avec un séjour de trois semaines de F. Kimmig dans ce laboratoire. Nous avons également une forte collaboration avec l'équipe de F. Ruggiero à l'IGFL (Institut de Génétique Fonctionnelle, ENS-Lyon, Université Lyon 1, INSERM), spécialisée dans le collagène et qui a fourni toute la peau échantillons que nous avons utilisés dans nos études. Nous collaborons également avec l'équipe d'E. Raspaud au Laboratoire de Physique des Solides (LPS, Université Paris-Sud, CNRS), qui possède une forte expertise dans la culture de biofilms. De plus, S. Imperiale a collaboré avec G. Bal (Columbia, New-York) sur l'inversion des mesures d'élastographie. M. Genet a une collaboration étroite avec L.C. Lee (Michigan State University) sur l'estimation du traitement de l'image. P. Moireau collabore également avec M. Rochoux (CERFACS), D. Lucor (CNRS), C. Zhang et A. Trouvé (Université du Maryland) sur l'assimilation des données pour les modèles de propagation des incendies de forêt. Enfin, dans le cadre du projet européen VP2HF, nous avons partagé des méthodes et des outils logiciels (au sein de la bibliothèque Verdandi) avec ses partenaires. En particulier, nous collaborons avec Philips Research Hambourg (A. Groth et J. Weese) dans la définition d'estimateurs mécaniques efficaces utilisant des images médicales.

En ce qui concerne nos collaborations cliniques, les plus importantes concernent l'hôpital Lariboisière à Paris, l'hôpital Henri Mondor à Créteil, le St-Thomas Hospital à King's College London, et Southwestern Medical Center à l'Université du Texas à Dallas.

Principaux résultats juillet 2013 - juin 2018

1) Modélisation multi-échelles mécanique et mathématique

Les principales spécificités du travail de modélisation sont

- (1) L'interaction profonde entre la modélisation (bio) physique et les méthodes mathématiques / numériques - en particulier via des considérations énergétiques qui fournissent des outils d'analyse et d'interprétation très puissants et englobants.
- (2) Les aspects multi-échelles omniprésents, réalisés via diverses stratégies mathématiques,
- (3) Les validations expérimentales détaillées, et / ou les démonstrations de concepts orientées vers des applications cliniques, qui souvent elles-mêmes ont motivé la modélisation.

Modélisation multi-échelle des tissus mous Dans le cadre de la thèse de F. Wijanto, nous avons proposé un nouveau modèle pour décrire la réponse des fibres de collagène étirées dans les tissus biologiques. Des observations expérimentales ont montré que la longueur d'une fibre augmente pendant le premier étirement à un niveau donné, mais aussi que cette extension peut disparaître si la fibre est laissée au repos. Ce comportement plastique réversible n'est pas bien décrit dans les modèles actuels qui utilisent au mieux la viscoélasticité classique macroscopique. Nous avons proposé de considérer l'interaction entre les fibrilles individuelles de collagène assemblées pour constituer la fibre, avec des jonctions non permanentes constituées de molécules adhésives. L'étirement de la fibre allonge ces molécules, favorisant ainsi leurs détachements, tandis que toute molécule détachée est libre de se rattacher à un nouvel emplacement, recréant une liaison non étirée entre les deux fibres. Ce travail a été présenté dans diverses conférences internationales (ESB 2016, EBSA 2017, ICCB 2017), et un document est en préparation.

Modélisation multi-échelles de la contraction musculaire Ce travail vise à proposer des modèles multi-échelles de la contraction musculaire utilisable dans le cadre de la simulation cardiaque, dans des applications spécifiques où des phénomènes à très petite échelle temporelle ou spatiale conditionnent les réponses d'un muscle soumis à des changements de charge rapides. Dans ce but, nous avons proposé un cadre chimio-mécanique par lequel les ponts transversaux dans les sarcomères sont considérés comme des entités chimiques spéciales ayant des degrés de liberté mécaniques internes. Ceci fournit une base thermodynamique pour modéliser l'interaction complexe des phénomènes chimiques et mécaniques au niveau du sarcomère. Nous avons dérivé les équations de Langevin (stochastiques) correspondantes et les équations de Fokker-Planck associées, à savoir les équations aux dérivées partielles régissant les distributions de probabilité dans les degrés de liberté.

Modélisation asymptotique pour l'électrophysiologie cardiaque en couplage avec la mécanique L'électrophysiologie cardiaque décrit les phénomènes chimio-électriques qui déclenchent la contraction cardiaque. Ces phénomènes, associés à des déplacements d'ions dans les milieux intra- et extracellulaires et à travers les membranes cellulaires, sont souvent résumés par des EDP - modèle « bidomaine » - généralement supposées indépendantes des facteurs cardiaques et des déformations. Afin de considérer ces déformations d'une manière physiquement et mathématiquement cohérente, il est nécessaire de revenir aux équations de pré-homogénéisation d'origine et de déterminer comment ces équations initiales et l'homogénéisation qui en résulte sont affectées par les déformations. Nous avons appliqué avec succès ce programme et proposé simultanément une nouvelle justification complète de la dérivation des équations bidomaines par convergence à deux échelles.

Discretisation temporelle et spatiale préservant l'énergie pour une formulation poromécanique non linéaire générale Un modèle poromécanique général non linéaire a été proposé en partant du principe fondamental de la thermodynamique pour représenter le couplage de fluides internes rapides avec de grandes déformations du solide [Chapelle et Moireau14]. La motivation principale de cette classe de modèles était de représenter la perfusion sanguine dans le muscle cardiaque - dans lequel les déformations finies et les écoulements rapides de fluides sont essentiels -, mais de nombreuses autres applications peuvent être envisagées, comme la modélisation pulmonaire. Nous avons ensuite formulé un ensemble complet de méthodes numériques pour ce modèle (thèse de B. Burtschell). Nous avons d'abord proposé un schéma de discrétisation partitionné en temps, cohérent avec l'énergie, pour permettre l'utilisation des schémas temporels existants - et éventuellement des solveurs séparés - pour chaque composant du modèle, c'est-à-dire pour le fluide et le solide [RCL-17-14]. En outre, nous avons analysé les effets de verrouillage numérique spécifiques qui

se produisent dans ce type de modèle en raison de la conservation globale du volume dans le système couplé, et avons fourni une solution efficace, avec une analyse complète des erreurs dans un modèle linéarisé. Enfin, nous avons dérivé une réduction dimensionnelle 0D de ce modèle pour permettre des simulations cardiaques rapides [thèse de B. Burtshell].

Modélisation multi-échelle des mécanismes de remodelage cardiaque Nous commençons à relever le défi capital de combiner des considérations multi-échelles spatiales et temporelles, afin de représenter les mécanismes de remodelage cardiaque - évolutions associées à des constantes de temps beaucoup plus longues que le battement cardiaque. Un nouveau doctorant (Ezgi Berberoglu, co-dirigé par M. Genet et S. Kozerke de l'ETH Zurich, financé par le Fonds national suisse) a été recruté en février 2017. Les objectifs de ce doctorat sont de proposer des modèles décrivant les changements structuraux au niveau de la cellule et les changements mécaniques au niveau du tissu au cours de la croissance pathologique et du remodelage du cœur. À cette fin, une loi de croissance et de remodelage sera formulée et sera validée à l'aide des mesures par imagerie par résonance magnétique longitudinale in vivo de la microstructure, du tissu et de la fonction cardiaque - acquises à l'ETH Zurich – sur des modèles animaux d'infarctus du myocarde et de ventricule gauche.

Modélisation mathématique et numérique de la propagation des ondes élastiques dans le cœur Une série de travaux est orientée vers la modélisation mathématique et numérique des ondes dans les milieux élastiques complexes tels que le tissu cardiaque. Une motivation importante pour cela réside dans les nouvelles techniques d'élastographie cardiaque. Premièrement, en linéarisant notre modèle cardiaque, nous avons pu représenter les petites perturbations associées aux ondes élastiques, puis relier localement l'état actuel de la contraction à la vitesse de propagation des ondes de cisaillement planaires mesurées en élastographie transitoire cardiaque. Sur la base d'un modèle de rythme cardiaque physiologiquement calibré, nous avons obtenu des vitesses d'ondes en excellente adéquation avec les données expérimentales acquises à l'Institut Langevin (un article commun en préparation). L'objectif ultime - en accord avec le doctorat en cours de F. Caforio - est d'effectuer des simulations numériques détaillées des phénomènes clés impliqués dans l'élastographie transitoire. Parallèlement, des stratégies numériques spécifiques ont été proposées et analysées, orientées vers deux aspects principaux :

1. La conception d'une discrétisation effective efficace des équations ondulatoires, en particulier en ce qui concerne les problèmes liés aux problèmes raides - comme dans les milieux presque incompressibles - voir [Chabassier et Imperiale, IJNME 2015], et avec une viscosité importante comme dans les tissus biologiques.
2. La construction d'une discrétisation spatio-temporelle adaptée à la propagation des ondes dans des milieux quasi-incompressibles, où coexistent des « quasi-ondes de pression » et des « ondes de quasi-cisaillement » avec des vitesses de plusieurs ordres de grandeur. Nous avons suivi deux voies, à savoir le découplage des deux types d'ondes (jusqu'à la frontière) en milieux isotropes homogènes qui ont été exploités pour proposer des méthodes originales de discrétisation par éléments finis, et pour des milieux plus complexes, utilisation d'une approche basée sur des éléments finis spectraux et une discrétisation temporelle implicite-explicite.

Modélisation du système coeur-thorax

La sismocardiographie (SCG) consiste à mesurer les déplacements du sternum et des côtes générées par les battements cardiaques à l'aide d'accéléromètres. Dans ce contexte, à partir du modèle numérique du cœur existant, d'autres étapes de modélisation ont été développées afin de modéliser ces mesures, notre objectif final étant orienté vers des problèmes inverses de l'activité cardiaque. Un modèle élastodynamique linéaire de toute la cage thoracique a été mis en place, en tenant compte des matériaux hautement hétérogènes (cartilage et os) dans une géométrie 3D réaliste, et l'effet du cœur est représenté par un contact unilatéral appliqué sur les parties internes du thorax surface, alors que le thorax est considéré comme fixe pour le modèle cardiaque. Ce modèle est également utilisé pour interpréter les mesures fournies par un nouveau dispositif d'imagerie nommé ICARE conçu à l'Institut Langevin pour mesurer le mouvement de surface du thorax par ondes acoustiques.

Prédiction rapide de solutions périodiques

Calculer de manière rapides les solutions périodiques viscoélastiques est pertinent dans un contexte biomécanique, mais aussi dans diverses applications industrielles comme dans l'industrie du pneu. Nous avons

proposé une méthode rapide pour le calcul de solutions périodiques par ajout d'un terme de contrôle de l'erreur de périodicité en espace-temps dans l'équation dynamique directe. Tout d'abord, un problème d'évolution abstraite a été étudié. A partir de la solution analytique du problème modifié (contrôlé), un contrôle efficace a été construit, optimisant le spectre du problème. Ensuite, afin de confirmer numériquement les résultats théoriques, une simulation par éléments finis a été réalisée sur un modèle 3D complet pour le roulage régulier d'un pneu viscoélastique à sculpture périodique. Cela a démontré que la solution contrôlée converge plus vite que la solution non contrôlée, et que l'efficacité de la méthode augmente avec le temps de relaxation du problème, c'est-à-dire lorsque la mémoire du problème sous-jacent est grande [RCL-18-20, 18-21].

2) Problèmes inverses

Notre objectif - et notre originalité - dans cet axe de recherche est de contribuer à l'ensemble de la chaîne mathématique depuis les problèmes inverses et la formulation du problème d'assimilation des données jusqu'à sa résolution pratique, avec un accent particulier sur les problèmes cardiovasculaires.

Estimation multi-physique Dans notre travail [Corrado, Gerbeau et Moireau, JCP15], nous avons étudié le problème inverse de l'électrocardiographie sous un angle nouveau, en combinant des mesures électriques et mécaniques enregistrées sur les données ECG, mais aussi sur les déplacements mécaniques du tissu cardiaque mesurés sur images médicales. À cet égard, nous établissons dans ce travail la convergence d'un estimateur séquentiel qui combine pour de tels problèmes couplés diverses méthodes d'assimilation de données séquentielles : un observateur de Luenberger pour l'état mécanique, un filtre de Kalman à ordre réduit appliqué sur les paramètres à identifier, et une projection POD de l'état électrique. Ensuite, en utilisant des données synthétiques, nous montrons les avantages de notre approche pour l'estimation de l'état électrique des ventricules le long du rythme cardiaque. Plus récemment, nous avons commencé à étudier des problèmes d'estimation multi-échelles pour des tissus mous tels que la peau. Cette caractérisation nécessite cependant des expériences complexes. En plus du développement d'une nouvelle méthode expérimentale de traction biaxiale pour la peau des souris, nous avons placé notre installation sous un microscope pour surveiller l'évolution de la microstructure pendant le test (voir la section expérimentale). Afin d'identifier les mesures résultantes, nous avons développé une approche qui combine des champs macroscopiques, des termes d'ajustement de mesure et une corrélation d'histogrammes d'orientation de microstructure basée sur les distances de Wasserstein.

Problèmes inverses en élastographie Sur ce sujet, une première contribution a été réalisée en collaboration avec G. Bal (Université de Columbia). Nous avons considéré la reconstruction des déplacements élastiques internes à partir des mesures ultrasonores. Par interférométrie appropriée et transformation de Fourier à fenêtre glissante des mesures ultrasonores, nous avons proposé une procédure de reconstruction de la structure vectorielle du champ de déplacement élastique spatial des tissus biologiques. Ceci fournit une modélisation et une généralisation des procédures de reconstruction scalaire couramment utilisées en élastographie. Plus récemment, nous avons étudié le sujet complémentaire de la récupération d'un état initial compact de l'équation d'onde dans un domaine non borné (tel que le plan entier, un guide d'onde ...). L'originalité de notre travail réside dans l'extension des méthodologies d'observation aux domaines non bornés.

Mesures et estimation basées sur la forme ou l'image Nous avons proposé un observateur de Luenberger pour estimer les modèles de réaction-diffusion avec propagation de front, à partir de mesures de l'emplacement du front dans le temps. Nous avons publié deux résultats importants en 2015 où la rétroaction de l'observateur est dérivée de la dérivée de forme et de la dérivée topologique de la mesure de similarité des données. Dans nos travaux les plus récents, nous avons adapté cette approche au modèle auriculaire à surface bicouche de la propagation des potentiels d'action, et l'avons évalué pour la première fois sur un ensemble de données de patients réels à partir des temps d'activation locaux.

Dans le cadre du projet européen VP2HF, nous avons participé à l'extension de l'outil de segmentation d'images développé par Philips Hamburg (Alexandra Groth, Jurgen Weese) pour traiter des images cliniques ciné-MR de

routine afin de créer des modèles anatomiques de coeurs. Deuxièmement, avec A. Groth et J. Weese, nous avons défini un opérateur de discordance - entre un modèle cardiaque biomécanique et des images ciné-MR - qui ne nécessite pas de segmenter les images MR avant l'assimilation des données. Les résultats initiaux de l'estimation d'état utilisant cet opérateur de discordance ont été présentés lors de la 2ème réunion d'évaluation VP2HF (Décembre 2015).

Nous avons également développé une nouvelle formulation continue de la technique de régularisation de données par contrôle de l'écart à l'équilibre de la solution observée pour la corrélation d'image par éléments finis. Cette régularisation pénalise essentiellement tout écart par rapport à la solution d'un corps hyperélastique en équilibre sous chargement prescrit à la frontière. Nous montrons également que la déformation équilibrée est capable d'extraire les principales caractéristiques de déformation à la fois sur les images de résonance magnétique cardiaque taggées ou non taggées. Notons enfin que, concernant la modélisation biomécanique basée sur l'image, nous améliorons également la solution du problème d'identification d'une configuration de référence sans contrainte à partir des images in vivo de tissus et organes mous chargés et précontraints. En effet, nous montrons qu'une addition simple et peu coûteuse à la méthode de Sellier basée sur le processus delta-carré d'Aitken peut non seulement assurer la convergence mais aussi accélérer considérablement la méthode [RCL 17-56].

Fondements théoriques de l'assimilation des données Le filtre de Kalman (-Bucy) donne la solution optimale (variance minimale) au problème d'estimation d'état pour les systèmes linéaires à état initial gaussien avec bruit blanc d'entrée et de sortie. D'un autre côté, la mise en œuvre du filtre de Kalman en temps discret est simple car elle est facilement formulée de manière algorithmique. Ainsi, il peut être tentant d'utiliser le filtre à temps discret sur le système à temps continu échantillonné dans le temps. Nous étudions dans [RCL-18-1] la convergence de l'estimation d'état obtenue à partir du filtre de Kalman en temps discret vers l'estimation en temps continu à mesure que la discrétisation temporelle est affinée. Dans le travail [RCL-16-1, 18-2], nous proposons une méthode itérative pour l'estimation conjointe de l'état et des paramètres en utilisant des mesures sur un intervalle de temps fini pour les systèmes qui sont stabilisables par remontée en temps. Par la suite, nous développons enfin des formulations exactes de l'estimateur optimal et du filtre pour un cadre non linéaire.

Estimation des moments de mesure pour la dépolymérisation amyloïde Ce travail est une collaboration avec l'équipe-projet Mamba de l'INRIA pour résoudre les problèmes inverses associés à la dépolymérisation amyloïde. Dans un premier travail [RCL-16-3], nous estimons les vitesses de réaction et les distributions de taille des polymères protéiques car cette estimation est une étape importante pour comprendre les mécanismes de mauvais repliement et d'agrégation des protéines qui sont une caractéristique clé des maladies amyloïdes. Dans un second travail [RCL-17-3], nous proposons une stratégie basée sur l'assimilation de modèles et de données pour étudier certains processus d'oligomérisation du prion. En intégrant par assimilation de données les mesures de moment de la distribution de taille et de taille moyenne à des modèles cinétiques, nous avons révélé l'existence d'au moins deux ensembles structurellement distincts d'assemblages, appelés Oa et Ob, formant des assemblages O1. Nous proposons un modèle cinétique représentant les principaux processus de la voie d'agrégation des prions : polymérisation, dépolymérisation et désintégration. Les deux groupes interagissent en échangeant des monomères à travers un processus de désintégration qui augmente la taille de Oa. Nos observations suggèrent que les oligomères de PrP constituent une population très dynamique. Notez que l'amylose est aussi une pathologie cardiaque majeure étudiée par l'équipe.

3) Évaluations expérimentales et applications cliniques

Les études expérimentales et les applications cliniques sont cruciales pour motiver nos nouveaux efforts de modélisation, et pour valider la chaîne de simulation globale.

Mécanique cutanée à plusieurs échelles Au cours de la dernière décennie, notre équipe a développé une configuration originale pour observer l'évolution de la microstructure des tissus riches en collagène tels que le tendon, la cornée [RCL-16-9] ou la peau. Cette configuration combine un dispositif de traction et un microscope optique non linéaire pour mesurer simultanément des informations sur la microstructure et des quantités mécaniques telles que l'étirement et les forces. Au cours des dernières années, nous nous sommes concentrés sur la peau, et plus particulièrement sur la peau des souris. Au cours de la thèse de B. Lynch

(soutenue en septembre 2015), nous avons accumulé un très grand nombre d'observations de l'évolution des orientations des fibres de collagène, en même temps que des données mécaniques. Nous avons également développé des outils pour quantifier sur images l'organisation du collagène, afin qu'elles puissent être liées à des données mécaniques. Toutes ces observations nous ont conduit à remettre en question l'interprétation classique de la relation entre la force et la microstructure du collagène [RCL-17-35]. Nous avons développé une nouvelle interprétation du rôle du collagène dans le comportement contrainte-étirement [RCL-17-43] où chaque fibre de collagène fournit une force donnée au tissu, avec un comportement plastique.

Expériences biaxiales et identification des paramètres

Nous avons développé une configuration pour les charges biaxiales des tissus planaires, tels que la peau, qui est également compatible avec l'utilisation sous un microscope. Nous avons étudié les meilleurs chemins de forme et de chargement pour extraire des informations de nos expériences biaxiales, en mesurant les forces dans quatre positions et les déplacements sur un grand nombre de points (typiquement quelques centaines) par corrélation d'image numérique. Nous avons effectué cette étude sous l'hypothèse d'une réponse hyperélastique avec prise en compte éventuelle de l'anisotropie. En supposant une homogénéité latérale des propriétés mécaniques, nous avons conclu que des échantillons en forme de croix, avec une asymétrie entre les différents bras de la croix, et chargés de manière alternative en temps, fournissent des résultats optimaux [RCL-17-1]. Nous avons utilisé cette approche pour identifier les paramètres mécaniques de la loi de Holzapfel, qui sont très similaires aux valeurs de la littérature. Nous avons également utilisé la même approche pour suivre l'organisation des fibres de collagène dans trois positions (un bras horizontal, un vertical et le centre de la croix), pour observer la conséquence d'un changement de direction de chargement sur la réorientation de la fibre.

Croissance du biofilm Nous avons étudié en collaboration avec l'équipe de E. Raspaud au Laboratoire de Physique des Solides (LPS), Université Paris Sud, CNRS, l'effet du confinement sur la croissance des biofilms bactériens. Ces biofilms, en plus de leur fort intérêt biologique et médical, constituent un bon modèle pour étudier la croissance. Nous avons été en mesure de mesurer la force que le biofilm confiné exerce sur son environnement à travers une paroi déformable, en utilisant un protocole spécialement conçu. Nous avons mesuré ainsi de très faibles contraintes résiduelles (quelques Pa), pour des morceaux en compression importante (environ 20%) [DAR15, HDA + 16]. Cette approche unique pour quantifier le stress résiduel induit par la croissance dans un système modèle ouvre un grand nombre de questions. En effet, malgré leur apparente simplicité, les biofilms sont des systèmes complexes qui combinent l'adaptabilité de la bactérie à l'organisation interne. Ils restent mal compris, et en particulier leur capacité à s'adapter aux évolutions de leur environnement mécanique n'a pas encore été explorée, comme nous l'avons souligné dans une revue récente [RCL-17-26].

Applications cliniques La traduction des techniques de modélisation et d'assimilation des données développées dans notre équipe en applications cliniques se poursuit dans trois directions principales :

1. Modélisation cardiaque à des fins de surveillance en anesthésie et en médecine de soins intensifs
2. Modélisation cardiaque dans les cardiopathies congénitales
3. Modélisation cardiaque dans les cardiopathies non congénitales.

Le thème 1 est soutenu par la collaboration avec le Département d'Anesthésie et de Soins intensifs, Hôpital Lariboisière à Paris, où F. Vallée (à temps partiel 50% avec M3DISIM) occupe un poste d'anesthésiste consultant et A. Le Gall (full candidat au doctorat dans l'équipe) est anesthésiste spécialisé. Dans cette collaboration, nous développons des modèles de système cardiovasculaire dans le but d'interpréter les données de débit aortique et de pression artérielle acquises en continu lors d'anesthésie générale de patients présentant un risque accru de complications cardiovasculaires. Différents types de techniques de modélisation d'ordre réduit développés dans notre équipe [Matthieu Caruel, Radomir Chabiniok, Philippe Moireau, Yves Lecarpentier, and Dominique Chapelle 2014] sont utilisés à des fins de surveillance. Deuxièmement, nous visons à appliquer les modèles pour prédire l'effet de l'intervention médicamenteuse afin d'administrer la combinaison optimale d'agents dans un état donné d'un patient (brevet scientifique soumis, et documents en rédaction sur "Calibration du modèle cardiaque au repos et stimulation par la noradrénaline en anesthésie générale", et "Modélisation du choc hémorragique et sa gestion").

Bien que les maladies étudiées dans le thème 2 soient relativement rares, l'originalité de chaque cas et les suivis des patients tout au long de leur vie en font des cibles idéales pour la modélisation personnalisée, y compris à plus long terme. Afin d'avoir accès à un nombre suffisant de patients atteints d'une maladie donnée, plusieurs

centres reconnus internationalement pour les cardiopathies congénitales ont été rassemblés pour collaborer avec notre équipe. Les questions spécifiques abordées sont les suivantes : (a) détection précoce assistée par modèle d'une détérioration de certains états cardiaques congénitaux spécifiques (actuellement concentrée sur une défaillance précoce de la connexion cavo-pulmonaire totale, la "circulation de Fontan ; et (b) le moment optimal de l'intervention, par ex. sur les valvules cardiaques (représentées par [RCL-18-34]). Les principaux collaborateurs cliniques sont l'hôpital St Thomas, King's College London (où R. Chabiniok a des vacances cliniques) et la division de cardiologie pédiatrique au Centre médical de l'Université du Texas à Dallas ; enfin, une nouvelle collaboration avec le Children's Heart Center de l'hôpital universitaire Motol de Prague se met en place.

Le thème 3 utilise des techniques de modélisation appliquée dans les cardiopathies ischémiques et non ischémiques, pour lesquelles notre équipe a toujours été considérée comme un acteur actif. Actuellement, nous renforçons la collaboration sur la modélisation de l'amyloïdose cardiaque avec nos collaborateurs de longue date des Départements de Cardiologie et de Radiologie de l'Hôpital Henri Mondor à Créteil. Le protocole d'acquisition détaillé a été mis au point par une interaction directe entre les partenaires cliniques et nous à la mi-2017. Le recrutement des patients est prévu pour début 2018.

SWOT Pôle Mécanique du Vivant/Equipe projet M3DISIM

<p>Points forts</p> <ul style="list-style-type: none"> Double culture, mathématiques appliquées (EDP, problèmes inverses, calcul scientifique) mécanique (modélisation, thermodynamique, multiéchelle) - outils logiciels développés dans l'équipe mélangeant modélisation et assimilation de données - Médecins dans l'équipe - Dispositif expérimentaux multiéchelles originaux (mesures combinées microstructure et essai macros) - Interface avec des équipes à la pointe en clinique (Kings College) ou en expérimentation sur des cellules cardiaques (Laboratory of Physiology, Florence) - Participation à des consortiums dans des projets européens - résultats majeurs : première équipe à réaliser un résultat d'assimilation de données sur un modèle 3D cardiaque et des données cliniques 	<p>Points faibles</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les aspects expérimentaux ne sont portés que par un seul permanent - Les propriétés actives des muscles cardiaques sont difficiles à étudier expérimentalement (conservation) - Les résultats cliniques sont des preuves de concepts (pas de résultats sur des cohortes) - Fragilité de la présence des médecins dans l'équipe (aucun permanent).
<p>Opportunités</p> <ul style="list-style-type: none"> - Outils institutionnels pérennisant les médecins dans l'équipe : (détachements APHP) - Validations au niveau tissus et organes - Financements sur des projets à impact clinique 	<p>Risques</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les entreprises majeures (Philips) du domaine collaborent presque uniquement à travers des projets européens - Dispersion liée au positionnement à l'interface - reconnaissance éparse du fait de la dispersion

3-2 Données chiffrées

Voir fichiers Excel joints au dossier (données contrat en cours et données prochain contrat).

3-3 Sélection des produits et des activités de recherche

La **production scientifique du laboratoire est décrite en annexe 4**. Rappelons en particulier que **4 HdR et 40 thèses** ont été soutenues pendant la période de référence.

Distinctions

Au-delà de l'attribution de son ERC, K. Danas a reçu en 2017 une médaille de bronze du CNRS et a donné plusieurs conférences invitées dans des congrès à forte visibilité (ICTAM, IUTAM) et une conférence plénière à l'IDDRG (International Deep Drawing Research Group Conference). Patrick Le Tallec a été conférencier plénier au World Congress of Computational Mechanics WCCM2014). D. Mohr a reçu en 2016, un "Young Investigator Award" de l'International Journal of Plasticity. Michel Jabbour a reçu en 2018 le prix Jacques Plumey de l'Académie des Sciences, et Martin Genet a reçu « the Young Investigator Award de la société de biomécanique française au 8th World Congress of Biomechanics » à Dublin en 2018.

Activités Editoriales

Le laboratoire est impliqué dans les comités éditoriaux des grandes revues internationales :

Journal of the Mechanics and Physics of Solids (*Basile Audoly éditeur associé, Nick Triantafyllidis membre du comité*)

Journal of Elasticity (*Jean-Jacques Marigo*)

Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering (*Patrick Le Tallec*)

Computer and Structures (*Dominique Chapelle, Patrick Le Tallec*)

Extreme Mechanics Letters (*Basile Audoly*)

International Journal of Plasticity (*Dirk Mohr*)

International Journal of Numerical Methods in Engineering (*Patrick Le Tallec*)

International Journal of Solids and Structures (*Dirk Mohr*)

International Journal of Impact Engineering (*Dirk Mohr, éditeur associé*)

Mathematical Modelling and Numerical Analysis (*Dominique Chapelle*)

Mathematics and Mechanics of Complex Systems (*Jean-Jacques Marigo*)

Oil & Gas Science and Technology (*Pierre Bérest*)

Enfin, Alexandre Dimanov est "Guest Editor" de la revue "Geosciences" pour l'édition spéciale "Micromechanics of Halite"

Membres du LMS avec des positions invitées :

Deux chercheurs du LMS ont été invités pour une période d'un an dans une grande université internationale : Andrei Constantinescu, professeur invité à l'ETH à Zürich de 2015 à 2016 Basile Audoly professeur invité à Caltech de 2017 à 2018.

Conférences invitées

- **P. Le Tallec** a été conférencier au Midwest seminar tour (2017).
- **A. Dimanov** a été conférencier invité à un colloque en l'honneur de G. Dresen au GFZ de Potsdam en 2015 et à un colloque à la mémoire de C. Froidevaux à l'ENS Paris en 2016.
- **J. Raphanel** a été conférencier invité à un Symposium en l'honneur de C. Teodosiu, 2015 à la Jamaïque, et à un Symposium à la mémoire de J. Gracio, 2016 à Aveiro, au Portugal.
- **V. Doquet** a donné une keynote lecture, lors de la 8^{ième} International Conference on Materials Structure & Micromechanics of Fracture, en République Tchèque, en 2016, une conférence invitée lors d'une Journée Scientifique de la Fédération Francilienne de Métallurgie (Fermi), en 2016 et une conférence invitée lors du 9^{ième} Colloque Mécanique, Matériaux, Microstructure, en 2014, à l'INSTN.

- **P. Bérest** a été conférencier invité aux réunions de l'American Geophysical Union à San Francisco, Californie, et d'Eurokarst à Neuchâtel, Suisse, en 2016.
- **A. Dimanov** a co-organisé une session à l'Assemblée Générale Annuelle de l'European Geosciences Union, en 2017.
- **E. Charkaluk et V. Doquet** ont été invités à donner en 2017 un cours introductif au Colloque National Mécamat d'Aussois.
- **N. Triantafyllidis** a donné une session plénière au congrès PACAM 2015
- **X. Boutillon** a été invité à donner une conférence invitée au 172^e congrès joint des sociétés américaines et japonaises d'acoustique en 2016 ainsi qu'au 22^{ème} CFM en 2015.

Signalons enfin le cours donné à Udine en 2018 par **M. Jabbour**.

Professeurs invités au LMS :

Le laboratoire reçoit régulièrement des professeurs étrangers. Les séjours les plus significatifs ont été ceux de Timothy Healey – Cornell, University pour un an entre 2016 et 2018, de Claudia Comi, Politecnico de Milano 2017-2018, deux mois sur 2017-2018, et Alexander Lion – Universität der Bunderwehr München, pour deux semaines.

Organisation des conférences :

Le laboratoire a été coorganisateur du congrès CSMA à Giens en 2017. Par ailleurs, E. Charkaluk est co-chairman de la série de conférences Low Cycle Fatigue organisées tous les 4 ans par la DVM.

3-4 Enseignement

Les membres du laboratoire ont contribué aux enseignements de l'École polytechnique en cycle Bachelor, en cycle ingénieur (Mécanique des Milieux Continus, Applications Industrielles en Mécanique, Mécanique des Structures Anélastiques, Problèmes inverses, Projets, encadrement de stages de recherche). Il est aussi acteur principal dans la spécialisation mécanique en troisième année de Master (N. Triantafyllidis, K. Danas L. Bodelot, E. Chabert et E. Charkaluk) et dans l'organisation des stages. Une quarantaine d'élèves est concerné chaque année.

Les chercheurs du laboratoire sont fortement impliqués dans le master MAGIS (Matériaux et Sciences de l'Ingénieur) avec responsabilité de filière ou de modules d'enseignement en Master de V. Doquet et K. Danas et des interventions en cours de J. Diani.

Le laboratoire a aussi monté en 2014 le parcours M4S (Multiscale and Multiphysics Modeling of Materials and Structures) de la mention mécanique des masters de recherche de l'Université Paris Saclay. Ce programme, suivi chaque année par plus d'une dizaine d'étudiants, est principalement piloté par des professeurs du laboratoire. Il s'intéresse à la description fine à échelles multiples de la réponse mécanique des matériaux et des structures. Sur ce sujet, le parcours M4S se propose comme un point de rencontre entre disciplines (mécanique, physique et mathématique), avec une formation poussée sur les aspects fondamentaux de la mécanique des matériaux et des structures, une attention marquée vers les aspects multiéchelle et multiphysique de la recherche dans ce domaine et une approche résolument mathématique. Il est actuellement animé par M. Jabbour avec des cours assurés par Andrei Constantinescu, Patrick Le Tallec, Jean Jacques Marigo et Nick Triantafyllidis. Ce master a des accords de double diplôme avec Caltech (2 étudiants par an) et Shanghai Jiao Tong.

Au niveau de Paris Saclay, il participe enfin au Master en Biomechanical Engineering (cours de Jean Marc Allain, Dominique Chapelle, Philippe Moireau), au Master Acoustical Engineering (coordination et cours pour X. Boutillon) et au Master Analyse, Modélisation et Simulation (P. Moireau).

A l'international, citons les cours de Patrick Le Tallec en Mécanique des Milieux Continus à Shanghai Jiao Tong University, le cours de Michel Jabbour sur le même thème à l'Université de Wuhan, les cours d'Eric Charkaluk en

fatigue et en thermomécanique à l'Université Polytechnique de Saint Petersburg, et le cours d'Andrei Constantinescu à l'ETH Zürich sur Nonlinear problems in elasticity.

3-5 Faits marquants

Au-delà des distinctions et grands projets cités dans le bilan scientifique, quatre faits peuvent être retenus comme majeurs et impactant la stratégie scientifique, l'organisation et la vie de l'unité. On notera donc par ordre chronologique :

- Création de la plateforme PLATINE commune avec le LPICM (démarrage du projet en 2014)
- Création de l'équipe commune LMS/INRIA M3DISIM au cours de l'année 2016
- Création du Centre de Fabrication Additive en 2017
- Lancement de la CHAIRE ARKEMA – Annonce le 1^{er} juin 2018

4- Organisation et vie de l'unité

4-1 Pilotage, animation, organisation de l'unité

Structures de pilotage

Au-delà de l'assemblée générale réunie une fois par an, et du conseil de laboratoire qui se réunit en moyenne 4 fois par an, le laboratoire est muni de deux structures de pilotage (annexe 3) :

Un comité de direction qui se réunit deux fois par mois, regroupant le directeur, l'adjointe au directeur, les animateurs de pôle et le vice-président du département de mécanique ;

Un comité expérimental qui regroupe l'ensemble des chercheurs concernés par les équipements expérimentaux, les responsables de plateforme, et les ingénieurs de recherche, il se réunit de deux à trois fois par an pour faire un tour de table des plateformes, définir leur politique de développement et mettre en place les besoins de financement associés.

Plateformes expérimentales

Les moyens d'essais du laboratoire se regroupent sur quatre plateformes décrites en annexe 2.

- **La plateforme Modélisation et Calculs** rassemble l'ensemble des moyens informatiques (infrastructure, matériels, logiciels) nécessaires aux expérimentations et aux calculs et à la modélisation en mécanique et en science des matériaux ainsi que les personnels (ingénieur informaticien, chercheur) en charge de leur maintenance et de leur développement.
- **La plateforme Moyens d'essais statiques et Dynamiques** regroupe l'ensemble des moyens du LMS pour développer des bancs d'essais originaux dans leur intégralité (conception mécanique, mesures, pilotage et traitement des données), ou en intégrant des équipements pré-existants, afin de répondre aux besoins en essais complexes des différents pôles de recherche du laboratoire
- **La plateforme MiMeCA (Microscopie, Mesures de Champs et Analyses)** regroupe l'ensemble des moyens du LMS pour l'étude du comportement mécanique des matériaux aux échelles fines (du mm au nanomètre). Elle constitue un lieu d'échanges, d'accueil, et de formation essentiel à la progression de la recherche expérimentale du Laboratoire Mécanique des Solides et de ses partenaires.
- **La plateforme Conception et Réalisation** conçoit et développe des prototypes de montages expérimentaux pour les essais mécaniques du Laboratoire en statique ou dynamique et joue en parallèle le rôle d'atelier de proximité pour des interventions sur les essais en salle d'expérience. Elle **inclut le centre de fabrication additive** qui met en œuvre et étudie les nouveaux processus de

fabrication par ajout de matière. Ce centre en co-développement avec l'IMSIA est articulé autour d'une imprimante 3D par dépôt de poudres métalliques par laser (Laser Metal Deposition – LMD) et autour de plusieurs imprimantes 3D à base de polymères.

Animation scientifique.

Au-delà des nombreuses réunions de travail, l'animation scientifique interne du laboratoire inclut

- un séminaire hebdomadaire très international (voir liste des invités)
- le symposium Jean Mandel organisé chaque année autour d'un invité de prestige, et permettant la présentation des travaux de doctorat du laboratoire devant un public ouvert (voir liste des invités en annexe).
- les séminaires réguliers des pôles Matériaux et M3disim
- le journal club animé et géré par les doctorants
- la journée d'accueil annuelle des nouveaux arrivants.
- la journée annuelle des doctorants avec exposé ou poster de tous les doctorants
- la journée annuelle de cohésion des ingénieurs et techniciens.

4-2 Parité

Bien que sensible à cette question, le laboratoire n'a pas mis en place de mesures particulières mais on peut noter, sur ces 5 dernières années, une évolution de l'effectif féminin (toutes fonctions, chercheurs, ITA, doctorants...) et un ratio femmes/hommes qui est passé de ~20 % à + de 30 % actuellement.

4-3 Protection et sécurité

La politique de protection et de sécurité du laboratoire s'appuie sur la politique générale et le plan mis en place par l'Ecole Polytechnique (plans et gestion des ZRR – Zone à Régime Restrictif, formation sécurité, plan de prévention et sensibilisation attentats, ...). Le LMS applique toutes les mesures qui lui sont demandées et forme son personnel.

Au niveau de l'unité, un agent de prévention est en place, ainsi qu'un adjoint récemment nommé pour les questions spécifiques de risques chimiques. Comme nous devons le faire au niveau réglementaire, nous rédigeons chaque année le (DU) document unique pour la prévention des risques professionnels avec suivi des actions à mettre en place.

L'installation du centre de fabrication additive a demandé un travail de protection et de mise en sécurité particulier, avec une forte implication du responsable de plateforme. L'ensemble du caisson-extraction d'air et les équipements de protection individuelle ont été mis en place après études et discussions notamment avec les commissions d'hygiène et sécurité de l'Ecole Polytechnique, de l'ENSTA et du CNRS. Il faut remarquer qu'il n'existe pas de référentiel national en la matière et les différents retours sur cette question nous permettent de penser que la sécurisation de l'installation à l'Ecole Polytechnique est exemplaire sur cette question.

En 2017, le LMS, sensible aux questions de qualité de vie au travail et d'accompagnement de son personnel, a initié une démarche de prévention des Risques Psycho-sociaux (RPS). Un questionnaire a été adressé à l'ensemble des agents du laboratoire quel que soit sa fonction et son employeur pour dresser un diagnostic sur l'ensemble des points tels que stress, charge de travail, management, reconnaissance, conditions de travail... Le résultat ayant été globalement positif (6 thèmes abordés – Résultats : aucun risque ou risque faible sur l'ensemble des thèmes) il n'a pas été nécessaire de mettre un plan d'action en place. Il a été décidé de mener cette action de prévention et suivi des RPS tous les 2 ans.

4-4 Ethique

Effectuer une recherche scientifique novatrice est une longue tradition à l'École polytechnique et au CNRS. La confiance dans les résultats obtenus est une condition essentielle de progrès et le laboratoire avec ses tutelles s'efforce d'éviter toute pratique préjudiciable à la qualité et à la notoriété des travaux scientifiques qui sont effectués en son sein.

A cette fin, le laboratoire bénéficie notamment de l'action de l'École polytechnique qui a mis en place un référent à l'intégrité scientifique et un comité composé de 4 membres. La mission du référent est d'être le premier interlocuteur pour tout manquement suspecté à l'intégrité scientifique (fraude, plagiat, falsification de données,...) En particulier, les étudiants, post-doctorants et chercheurs sont invités à prendre contact avec lui s'ils font face ou suspectent un problème de ce type.

5- Analyse SWOT

SWOT Laboratoire de Mécanique des Solides

<p>Points forts</p> <p>Nouvelles thématiques à l'interface de mécanique des solides, sciences de matériaux, électromagnétisme, électronique, biomédical.</p> <p>Chercheurs reconnus internationalement avec compétences en expérimentation et modélisation/simulation.</p> <p>Capacité à développer des essais nouveaux et/ou complexes</p> <p>Capacité à aborder de nouveaux thèmes</p> <p>Liens forts avec l'enseignement</p> <p>Qualité de l'environnement</p> <p>Collaborations avec des autres laboratoires de l'Ecole</p> <p>Rayonnement et collaborations internationales</p> <p>Soutien des partenaires européens (ERC) et industriels</p>	<p>Points faibles</p> <p>Postes vacants en expérimental</p> <p>Manque d'ingénieur système pour subvenir aux besoins du calcul intensif.</p> <p>Complexité de l'environnement administratif et partenarial.</p> <p>Concurrence internationale en recrutement des doctorants et des chercheurs de haut niveau.</p>
<p>Opportunités</p> <p>Développement des projets communs avec les laboratoires voisins en mathématiques appliquées, physique et matière condensée, médical.</p> <p>Utilisation de nouveaux procédés (impression 3D) pour le développement des matériaux architecturés</p> <p>Nouvelle thématiques (polymères actifs, moteurs électriques, ...)</p> <p>Développement du pôle mécanique et de New Uni.</p>	<p>Risques</p> <p>Perte de compétence et de ressources humaines par départ des agents.</p> <p>Difficulté à acquérir (coût) et maintenir (personnel) des moyens expérimentaux adaptés aux différents matériaux étudiés.</p> <p>Le déménagement vers le pôle Méca va fortement ralentir l'activité expérimentale et pourrait mettre en difficultés doctorants/post-docs</p> <p>Evolutions futures des thématiques géotechnique et dynamique rapide.</p>

6- Projet scientifique à cinq ans

Stratégie de développement de recherche du laboratoire de Mécanique des Solides

Le projet stratégique du Laboratoire de Mécanique des Solides se situe dans un double cadre de développement

- la mise en place d'un pôle mécanique sur le campus avec l'emménagement en 2021 de toutes les équipes de mécanique de l'Ecole Polytechnique et de l'ENSTA dans un même bâtiment.
- Le développement du centre de recherche pluridisciplinaire de l'Ecole Polytechnique et de New Uni, avec un positionnement du laboratoire sur deux priorités affichées à savoir Matériaux et innovation, et Biomedical Engineering.

Dans ce cadre, six axes concrets ont été mis en avant

- 1) Liens entre procédés d'élaboration, microstructures et propriétés mécaniques des matériaux.
- 2) Structures multiéchelles et dynamique
- 3) Multiphysique et couplages
- 4) Interfaces et transformation de phase
- 5) Mécanique en lien avec la médecine et la biologie
- 6) Observation et identification

Les quatre premiers relèvent de la priorité mise sur matériaux et innovation, et contribuent aux transitions énergétiques et technologiques auxquelles veut se confronter NewUni. Le deuxième, et les deux derniers sont des points clés dans le développement du biomedical engineering, avec un aspect observation et identification qui est fortement transverse à toutes les activités du laboratoire.

Ces axes de recherche sont aussi au cœur du développement du pôle mécanique prévu sur le campus à partir de 2021 :

- les aspects de structures multiéchelle et dynamique et les aspects de fabrication associée par voie additive ou autre sont très fortement partagés avec l'IMSIA ;
- les liens entre mécanique et médecine bénéficieront de la présence dans le futur bâtiment des équipes de mécanique du vivant du Ladhyx ;
- le développement d'une approche multiphysique est au cœur de nombreuses préoccupations des acteurs du pôle mécanique.

Ces axes vont aussi s'appuyer sur une stratégie de développement expérimental qui se met en place en concertation avec les autres participants du pôle mécanique et du centre de recherches, et avec l'Equipex Matmeca. De manière plus précise

- Les projets autour de la fabrication additive métallique et l'importance croissante des essais thermomécaniques couplés demandent une ré-actualisation progressive des équipements d'essais haute température (700°C) (uni-axial, fatigue et multi-axial). Ceci passera aussi par le développement d'essais mécaniques in-situ MEB à des températures élevées (>850°C) et/ou sous atmosphère réductrice, ce qui entraînera un développement matériel associé autour du MEB environnemental du laboratoire.
- Un effort particulier sera tourné vers la mesure de déformation sans contact, à l'aide d'outils développés en interne et en s'appuyant en parallèle sur l'Equipex Matmeca. Cela concerne l'amélioration des performances (précision, robustesse, versatilité), l'ergonomie des postes de travail, le pilotage temps en déformation mesurée optiquement, et le développement d'une imagerie numérique 2D 3D de précision. Une adaptation de la technique aux essais haute température doit être aussi envisagée.

- Le développement des recherches multiéchelle et multiphysique va nécessiter la conception/réalisation de machines d'essais dédiées (à des moyens d'observations spécifiques, parfois hors laboratoire, ou à des essais multiphysiques).
- Les activités polymères, structures de petite dimension, matériaux à grain ultra fin et matériaux TWIP repoussent les limites de notre champ d'observation microscopique actuel. Le développement d'essais mécaniques in-situ sous AFM apportera certes des éléments de réponses aux échelles qui lui sont propres, mais il sera nécessaire de réfléchir à l'acquisition d'un nouveau microscope électronique à balayage ou double faisceau. L'enjeu est double : garder notre capacité d'analyse et de caractérisation en phase avec les activités précitées, qui demande des observations et manipulation à très petite échelle (nm), et assurer la complémentarité des équipements au niveau de l'Equipex MATMECA.
- Enfin, la croissance de l'activité « polymères » au laboratoire amènera de nouveaux équipements à intégrer à la plateforme, avec de nouveaux savoir-faire à acquérir.

1) Liens entre procédés d'élaboration, microstructures et propriétés mécaniques des matériaux

Enjeux :

La révolution et la diversification des procédés d'élaboration (fabrication additive, fabrication de structures polymères à l'échelle nanométrique, électro-déposition, déformation plastique sévère, choc laser, photo-lithographie...) fait apparaître de **nouvelles microstructures**, suscitant de **nouvelles questions, à la fois techniques** (caractéristiques, stabilité thermomécanique, performances mécaniques des microstructures fabriquées, en relation avec les paramètres des procédés?) et **scientifiques** (effet du confinement sur le comportement des polymères? accommodation de la déformation par mobilité des joints de grains et/ou maclage dans des métaux nano-structurés ou à grains ultra-fins...)

Ces procédés donnent en outre la **possibilité d'architecturer** des matériaux (matériaux spécifiquement fabriqués pour tester et valider des modèles, tels que des matériaux à porosité contrôlée obtenus par impression 3D, des matériaux à microstructures bio-inspirées, ou des méta-matériaux "sur mesure" pour des propriétés spécifiques, telles que l'absence d'expansion/contraction thermique ou le caractère auxétique) et ce, à diverses échelles (dizaines de nanomètres pour polymères multi-couches, ou métaux nano-maclés, micro ou millimétrique pour des structures en treillis).

Il faut donc en premier lieu tirer parti des nouveaux moyens d'élaboration dont le Laboratoire s'est récemment doté (imprimante 3D métallique de type Laser Metal Deposition, imprimante 3D polymère, filière coudée chauffée pour le procédé ECAP) ou dont il pourrait prochainement disposer (demande de financement déposée pour une machine de photo-lithographie de type nanoscribe) pour imaginer et fabriquer de nouveaux matériaux, en explorant également d'autres procédés au LMS (Dynamic Plastic Deformation) ou en collaboration (électro-déposition, notamment).

Il faut ensuite être capable de **caractériser aux échelles pertinentes** les micro/méso-structures obtenues (morphologies, textures, contraintes résiduelles, hétérogénéité chimique éventuelle), leur **stabilité** dans le temps, en température ou sous chargement mécanique.

Il faut également concevoir, développer et réaliser les essais mécaniques les plus pertinents et discriminants pour bien **identifier les mécanismes fondamentaux** de déformation et d'endommagement à intégrer dans les modèles et, dans le cadre de recherches plus appliquées, d'imposer des sollicitations (souvent multiphysiques) les plus représentatives possibles des conditions de service, afin d'identifier les **paramètres microstructuraux les plus déterminants et dégager les microstructures optimales** pour obtenir les meilleures propriétés mécaniques et dans certains cas, fonctionnelles.

L'ensemble de ces éléments servira au développement de modélisations originales phénoménologiques ou multi-échelles dépendant de paramètres physiques et mécaniques clairement identifiés et permettant de décrire et/ou prédire le comportement mécanique des matériaux.

Axes de recherche :

Sans abandonner l'axe "**interfaces et joints de grains**" que l'on a commencé à explorer au cours du précédent quadriennal et qui reste central pour la maîtrise des propriétés mécaniques des métaux à grains ultra-fins,

nanostructurés, à structure hexagonale (Ti, Mg, Zn, Zr...) et plus généralement dans tous les métaux à haute température, de nouveaux axes seront abordés :

* Tirer parti des grandes vitesses de refroidissement de la fabrication additive (limitant les ségrégations) et de la possibilité d'utiliser des mélanges de poudres élémentaires en proportions variées pour élaborer des **alliages à haute entropie** dont on caractérisera les microstructures et les propriétés mécaniques (dureté, fatigue, fluage, ténacité, corrosion sous contrainte...) dans une large gamme de températures

* Explorer **les effets d'échelle** (confinement de la déformation par des interfaces) :

dans les polymères éventuellement renforcés (en utilisant les procédés SLM et NanoScribe) via des essais à échelle adaptée (classiques ou sous MEB ou encore sous AFM, où des mesures nano-mécaniques seront réalisées) couplés à des observations en temps réel et accompagnés de mesures de champs cinématiques et/ou thermiques.

dans les alliages à grains ultra-fins obtenus par déformation plastique sévère (ECAP) ou les métaux nano-maclés (que l'on obtiendra par Déformation Plastique Dynamique aux barres d'Hopkinson, à basse température, pour abaisser l'énergie de faute d'empilement).

* Les matériaux issus des nouvelles techniques d'élaboration étant souvent anisotropes, explorer les **conséquences mécaniques de cette anisotropie microstructurale** via des essais multiaxiaux. Développer notamment des approches prédictives des trajets et cinétiques de fissuration par fatigue de matériaux dont l'anisotropie empêche parfois la bifurcation de fissures pourtant sollicitées en mode mixte, nécessitant de nouveaux modèles qui font actuellement défaut.

Partenaires envisagés

Académiques :

ICMPE, PIMM, Onera, Navier, LGF (Saint-Etienne), Equipex Matmeca, LASIE (La Rochelle), LSPM, Centre des Matériaux, LEM3, synchrotrons Soleil/ESRF, CEA SRMA...

industriels:

Michelin, Ariane-Group, Arkema, Constellium, SNCF, Safran, CEA, Arcelor Mittal, IFPEN...

2) Structures multiéchelles et dynamique (Multiscale structures and dynamics)

Enjeux :

Le pôle « structures » du LMS s'intéresse depuis longtemps à la modélisation et au calcul des structures sous des chargements complexes ainsi qu'à leur durabilité et leur fiabilité. Au vu de l'importance clé des microarchitectures et microstructures dans les structures, il est crucial de développer les études et méthodes d'homogénéisation et de réduction thermodynamique de modèles, de prédiction et d'analyse d'évolution de microstructures, et de construction et analyse en dynamique et stabilité de microarchitectures variées.

Axes scientifiques :

Homogénéisation et réduction thermodynamique de modèles (non linéarités et problèmes couplés)

L'objectif général de cet axe est d'établir des relations entre microstructure et propriétés mécaniques de matériaux complexes et de tissus vivants. Dans le cas de microstructures hétérogènes (polycristaux, composites), il s'agit en particulier de construire des modèles à l'échelle macroscopique permettant de conserver sous forme de variables d'état ou de variables microstructurales, des descripteurs statistiques de la microstructure qui déterminent l'état énergétique aux joints de grains ou plus généralement le comportement effectif des composites. Les bilans d'énergie permettent de faire la part entre dissipation et stockage d'énergie lors d'une sollicitation thermomécanique. Ils doivent pouvoir être étendus aux cas de calculs d'agrégats polycristallins soumis à des conditions aux limites multiphysiques (température, déplacement, ...) en présence ou non de changements de phase, ce qui réclame des développements numériques en plasticité cristalline. Ainsi des calculs énergétiques à l'échelle du cristal, du polycristal ou du composite pourront être effectués pour un très grand nombre de microstructures de sorte à donner une forme analytique à l'énergie moyenne des différentes phases ainsi qu'aux joints de grains en fonction de ces descripteurs statistique microstructuraux. Par ailleurs, des évolutions de changement de phase (croissance d'un grain dont l'arrangement cristallin est différent) permettront d'évaluer sur un grand nombre de réalisations possibles, la puissance dissipée moyenne et le gain d'énergie lors de la transformation. Cette homogénéisation stochastique est le point de départ de la construction de modèles thermodynamiques dont les descripteurs statistiques de la microstructure (arrangement cristallins, désorientation, sphéricité des grains, répartitions des tailles, distribution et forme des particules, etc...) font partie des variables d'état microstructurales pour quantifier dans une vision macroscopique, une énergie et une dissipation qui révèle des mécanismes ayant lieu à l'échelle atomique, microstructurale et macroscopique. Cette analyse doit pouvoir s'appuyer sur des études expérimentales à plusieurs échelles permettant d'identifier les mécanismes de base associés.

Dans le cas des tissus vivants, qui se déforment de façon finie, nous travaillons à une méthode d'homogénéisation périodique non linéaire quasi-exacte pour des niveaux de déformation physiologiques. Le nombre de pré-calculs à effectuer au niveau microscopique est augmenté par rapport à l'homogénéisation périodique en linéaire, mais reste raisonnable. Spécifiquement au muscle cardiaque et aux poumons, nous mettons en place des microstructures représentatives aux différentes échelles caractéristiques (cellule musculaire, feuillet ; alvéole, lobule). Nous utilisons pour cela des données de la littérature, nous effectuons également nos propres travaux de microscopie, tout cela en collaboration étroite avec nos collaborateurs cliniciens.

Microarchitectures

Les nouvelles technologies d'impression 3D et l'acquisition et l'accès à différentes plateformes d'impression polymère ou métal, au sein du laboratoire ou dans le cadre de projets structurants (FAPS), imposent l'ouverture des calculs de structures vers les matériaux microarchitecturés. On s'intéresse particulièrement ici à l'adaptation des techniques d'optimisation topologique ou géométrique à des matériaux à comportement non linéaire, à des problèmes de stabilité et de flambage de ces matériaux ou encore à des problèmes d'homogénéisation.

Un cas particulier concerne alors le développement des modèles de coques équivalentes pour des matériaux architecturés quasi-2d, par exemple des gridshells (assemblage de poutres élastiques) des feuilles de caoutchouc architecturées par des motifs de découpe périodiques ou quasi-périodiques. Ces structures ont la

particularité d'être très déformables, d'avoir des modes de déformation non standard qui leur confèrent des propriétés inhabituelles (p. ex. pour un gridshell, module de cisaillement dans le plan tangent très faible, induisant une réponse non-locale à des déformation ponctuelles). Les modèles de coques équivalents permettront d'adapter les modèles numériques développés pour les coques, et de guider leur conception. De manière plus générale, il s'agit aussi de mettre au point des modèles réduits adaptés à l'étude des instabilités dans les structures élancées (quasi-1d) à comportement effectif complexe. Les instabilités peuvent résulter du comportement (p. ex. striction d'un barreau visco-plastique) ou de la géométrie (p. ex. claquage d'un mètre-ruban). Les modèles obtenus par réduction dimensionnelle permettront de caractériser les instabilités fidèlement et de façon analytique ; la mise en œuvre de modèles numériques est aussi possible et grandement simplifiée. Les applications sont nombreuses : influence de la triaxialité sur la striction de barreaux, modèle de poutre équivalent pour le claquage d'un mètre-ruban (brique servant à la conception des structures auto-déployables).

Parmi les approches expérimentales associées à ces milieux microarchitecturés, la caractérisation dynamique pourrait être mise en œuvre dans le cas de la fatigue à grand nombre de cycles des structures « lattices » obtenues par impression 3D et dans le cas des structures composites.

Evolutions des microstructures : endommagement – fatigue - remodelage

Au-delà des développements qui continuent d'être faits dans le domaine de la fatigue (prise en compte de la multiaxialité, des gradients, ...), une partie des nouvelles problématiques en fatigue des structures est liée à l'application de chargements cycliques multiphysiques (couplage avec la chimie dans le cas des réactions de lithiation/delithiation dans les batteries, couplage avec le magnétisme dans le cas des moteurs électriques). Le projet consiste ici à proposer des approches numériques couplées et d'étendre les calculs stationnaires ou directs à ces nouveaux types de chargements et comportements.

Cette approche macroscopique est à compléter par des analyses multiéchelle. En particulier, le remodelage conduit à une évolution des microstructures et des propriétés mécaniques des matériaux biologiques en réponse aux sollicitations mécaniques. L'enjeu est d'être capable de changer d'échelles, à la fois en espace et en temps. En espace, il s'agit d'être capable de relier l'organisation microscopique du tissu (réseau de fibres ou de cellules) à ses propriétés mécaniques macroscopique, et de conserver le lien entre états mécaniques (déformation, contrainte) macroscopiques et microscopiques. Ainsi, nous construisons des modèles de remodelage (e.g., croissance) pilotés directement par les grandeurs microscopiques (i.e., les sollicitations des cellules). En temps, il s'agit de comprendre comment la perturbation d'une sollicitation mécanique répétée rapidement (typiquement autour de la seconde pour le battement cardiaque ou les mouvements) induit des modifications sur des temps longs (quelques jours ou même mois). L'étude des muscles plus généralement nécessite une modélisation à différentes échelles spatiales et temporelles. Dans ce contexte et spécialement dans le premier cas, des méthodes mathématiques d'homogénéisation peuvent être utilisées pour connecter deux ou plusieurs échelles de façon efficace.

Partenaires envisagés :

Pole mécanique, ONERA, Navier, CEA , POEMS , PSA (CHAIRE ANDRE CITROEN), UPMC, Caltech, ETHZ

Financements potentiels et partenariats industriels :

Contrats industriels et accompagnement de thèses (ArcelorMittal, AddUp, PSA, SNCF, SafranTech, Thales, Total, Schlumberger)

Projets ANR et européens

ERC

3) Multiphysique et couplage

Enjeux

Au-delà des contraintes mécaniques seules, nombres de matériaux et structures d'intérêt pour la mécanique sont soumis à un—voire plusieurs—autre(s) type(s) de sollicitations. Ces **sollicitations** peuvent être de nature **chimique, magnétique, électrique, électronique** ou encore **thermique**.

Il est donc important de **prendre en compte les couplages multiphysiques** dans le **développement des modèles** pour **décrire et prédire le comportement** de ces matériaux et structures. Une **compréhension fine des couplages multiphysiques en jeu** est également indispensable pour envisager **d'optimiser le comportement des systèmes** ou de **proposer de nouveaux systèmes plus efficaces** tirant partie des couplages.

Les systèmes auxquels on s'intéresse dans le pôle multiphysique trouvent des **applications dans de nombreux domaines** : énergie, procédés industriels, transport, mécanique du vivant, santé, matériaux intelligents, capteurs et actionneurs.

Axes de recherche

Chimie et transports fluides dans les solides

- *Couplages physico-chimiques fluide/roche* : il s'agit de comprendre les couplages entre le transport diffusif et/ou hydraulique de fluides et le comportement mécanique à court et moyen terme des roches poreuses perméables (carbonates), ou faiblement perméables (argilites, sel gemme). Un premier aspect à traiter concerne l'évolution des propriétés mécaniques des roches réservoir (carbonates) sous l'effet de la percolation de fluides réactifs acides (stockage de CO₂) et de l'altération chimique de la roche qui s'en suit. Un deuxième aspect concerne le comportement mécanique de roches réactives comme les argilites, sujettes au gonflement/retrait ou aux transitions irréversibles de phase selon les conditions d'humidité relative ou de la composition chimique de la saumure. Par ailleurs, les mécanismes de dissolution-précipitation de matière au sein du réseau poreux permettent le fluage à long terme des roches sous très faibles contraintes déviatoriques.
- *Diffusion des éléments d'alliage* : on s'intéresse à construire des modèles de diffusion des éléments d'alliages pendant les changements de phase. Contrairement aux équations de diffusion classiques, avec transport de masse, on s'appuie ici sur un milieu généralisé ayant plusieurs champs de vitesse comme un milieu poreux (une vitesse solide pour le cristal, et des vitesses "fluides" pour les éléments d'alliage). L'analyse thermodynamique mixte (Lagrangienne pour le cristal et Eulérienne pour les éléments d'alliage) de ce milieu généralisé (dont la masse se conserve) permet d'envisager tous les couplages énergétiques entre le cristal et les éléments d'alliage à l'échelle du milieu continu.
- *Chémo-mécanique sous chargement cyclique* : on s'intéresse ici au couplage entre l'évolution d'une transformation chimique et du front de réaction associé et le comportement mécanique du matériau, en particulier dans le cas irréversible, le tout sous un chargement cyclique (mécanique, thermique, ...). On s'appuie pour cela sur la notion de tenseur d'affinité chimique, sur un cadre thermodynamique et sur le concept d'adaptation. Les applications concernent les phénomènes d'oxydation, de corrosion, de lithiation, ...
- *Interaction fluide/structure en mécanique du vivant* : dans ce domaine, il est encore nécessaire de formuler des modèles originaux d'interaction fluide-structure. C'est le cas par exemple pour les écoulements sanguins, pour lesquels des modèles 1D d'écoulements couplés à la paroi, compatibles avec des conditions d'entrée 3D et de sortie 0D, sont souhaitables pour représenter l'onde de pression. Un autre exemple concerne le couplage interne de la pomécanique pour lequel le vivant impose

de prendre en compte des régimes non-classiques (déformations finies et écoulements rapides, pour la perfusion du cœur et les écoulements dans les poumons en particulier). Un dernier exemple concerne le transport de médicaments sous-cutané avec le couplage chémo-mécanique associé. Bien entendu, dans chaque cas, la question des schémas numériques adaptés se pose de façon renouvelée.

- *Diffusion et chémo-mécanique pour le transport de médicaments sous la peau*

Magnéto-mécanique

- *Couplages magnéto-mécaniques sous chargements cycliques* : on s'intéresse aux couplages entre magnétisme, mécanique et thermique sous chargements cycliques, présents en particulier dans les machines électriques. Les objectifs sont : (1) de proposer un cadre de modélisation permettant le calcul de structures complexes en rotation; (2) de proposer l'approche numérique associée permettant la réalisation de ces calculs fortement non linéaires, et (3) de réaliser des essais de caractérisation de tôles ferromagnétiques sous champs mécaniques et magnétiques cycliques.
- *Réduction d'hystérésis dans les matériaux magnétiques* : de nombreuses applications, telles que les batteries ou encore les machines électriques, reposent sur des systèmes électromagnétiques. Pour ces systèmes, un enjeu majeur lié aux économies d'énergie est de réduire l'hystérésis magnétique. Ce problème est très complexe car hautement multi-échelle. Dans ce domaine, on envisage également d'étudier le remplacement des matériaux massifs magnétiques par des composites mous chargés de particules magnétiques.
- *Développement de nouveaux matériaux magnéto-rhéologiques à aimantation permanente* : suite à l'expérience déjà acquise sur les composites à matrice élastomère chargée de particules magnétisables sans rémanence, on envisage maintenant de s'intéresser aux élastomères magnéto-rhéologiques dont les particules peuvent être aimantées de façon permanente. Cela permettra d'aborder de nouvelles applications telles que les interfaces haptiques, la création de motifs de surface et les actionneurs.
- *Fabrication et exploitation des instabilités dans de nouvelles structures magnéto-rhéologiques* : ce sujet couvre l'étude théorique, numérique et expérimentale des instabilités dans des structures faites d'élastomères magnéto-rhéologiques. On s'intéressera en particulier aux structures auxétiques, chirales ou avec une géométrie complexe permettant de favoriser les instabilités. Le but est de maîtriser les instabilités présentes dans ces systèmes magnéto-élastiques pour obtenir des réponses qui peuvent être exploitées dans des applications telles que la création de motifs de surface, la création de micro-canaux ou le déplacement de robots mous.

Électro-mécanique

- *Modélisation électro-mécanique des moteurs électriques*. Pour concevoir et optimiser de nouveaux types de moteur il est important de calculer pas simplement les champs magnétiques et courants électriques (ce qui se fait actuellement dans le domaine pour le régime opérationnel) mais aussi les contraintes mécaniques subies par la structure. Or, ces calculs se font séparément en solvant deux problèmes différents (équations de Maxwell et mouvement mécanique), méthode qui ne prend pas en compte correctement les couplages et donc pas fiable pour modéliser correctement le problème, surtout en présence des phénomènes non linéaires qui seront importants dans la modélisation de fiabilité (flambage au cas des structures allégées, hausse de température au cas de court-circuit, phénomènes de saturation magnétique etc.)

- *Modélisation électro-mécanique dans les muscles* : il s'agit de poursuivre le travail démarré par l'équipe M3DISIM.
- *Optimisation de la réponse photovoltaïque sous chargement mécanique* : des travaux préliminaires, principalement expérimentaux, ont montré que la réponse électrique des cellules photovoltaïques déposées sur substrat souple variait sous chargement mécanique. Il convient maintenant de développer un modèle pouvant prédire le couplage électro-mécanique en jeu afin d'exploiter le chargement mécanique pour optimiser le rendement des cellules photovoltaïques.
- *Caractérisation de capteurs sous chargements mécaniques et multiphysiques* : ces travaux sont menés dans le cadre de l'équipe de recherche NACRE (commune au LMS, LPICM et à l'IFSTTAR) et du projet PLATINE (projet financé par la levée de fond de l'Ecole Polytechnique sur le sujet "Environnements intelligents : nanocapteurs et nanofabilité"). Des capteurs nanoarchitecturés sont développés pour répondre au travers de leur comportement électrique à différents stimuli (e.g. présence de polluants dans l'eau et l'air). Cependant, en conditions réelles d'utilisation, ces capteurs se retrouvent soumis à des sollicitations mécaniques, thermiques et hygrométriques qui impactent également leur réponse électrique. Il convient donc de développer des dispositifs adaptés à chaque type de capteur pour caractériser leur réponse électrique sous chargements multiphysiques couplés et ainsi identifier la réponse due au stimulus à mesurer parmi les autres signaux induits par l'environnement. On s'intéressera ensuite à identifier les mécanismes responsables du vieillissement des capteurs lors de leur utilisation afin d'améliorer leur fiabilité.
- *Matériaux magnéto-électro-mécaniques* : une extension naturelle des couplages magnéto-mécaniques et électromécaniques est le couplage magnéto-électro-mécanique. Il serait en effet désirable de pouvoir changer de façon cyclique le domaine de magnétisation par application d'un champ électrique ou mécanique (et vice versa). Cette étude requiert des développements théoriques, numériques et expérimentaux. On commencerait notamment par l'étude théorique et numérique des couplages dans les matériaux mous contenant des inclusions ferromagnétiques et diélectriques.

Thermo-mécanique

- *Couplages thermomécaniques dans les polycristaux* : lors de la déformation plastique de matériaux polycristallins, une partie de l'énergie apportée au matériau est dissipée et une autre partie est stockée (écrouissage). A plus petite échelle, ce stockage est réalisé au sein des structures de dislocations. Dans la continuité de travaux précédents, on s'intéresse ici à l'échelle intermédiaire du polycristal en vue d'établir numériquement et expérimentalement des bilans d'énergie sous chargement mécanique monotone et/ou cyclique. On cherchera à appliquer cette démarche à des aciers présentant des transformations de phase induites par la déformation et/ou des alliages à mémoire de forme.
- *Contraintes thermo-mécaniques dans des procédés de fabrication additive* : le procédé CLAD présent au LMS permet la réalisation de structures minces. Cependant, de telles structures peuvent flamber dû au champ de contraintes résiduelles issues de la fabrication (thermique cyclique). L'objectif est de proposer des approches semi-analytiques thermiques et mécaniques couplées, reposant sur des déformations libres (prenant en compte les déformations thermiques et de transitions de phase, ainsi que la plasticité de transformation) et permettant une estimation rapide des contraintes résiduelles et des déformations inélastiques. Elles s'appuieront sur des identifications faites à partir d'essais instrumentés (caméras dans le visible et dans l'infrarouge, thermocouples, ...) durant la fabrication de structures minces élancées.

- *Optimisation de procédés pour une utilisation industrielle* : beaucoup de procédés de mise en forme ont un impact significatif sur les microstructures et les caractéristiques du matériau produit. La simulation rapide de tels procédés permet d'envisager une optimisation. Des modèles mixtes énergétique/numérique/analytique sont développés en couplant les aspects thermiques et mécaniques incluant les changements de phase et les phénomènes associés (plasticité de transformation, déformation volumique). Des procédés liés au laminage sont particulièrement étudiés (laminage, table de sortie, bobinage).

Collaborations :

IMSIA, LPICM, LSI, LAL, ONERA, PMMH, Inria/UPMC,
University of Illinois at Urbana-Champaign, Department of Mechanical and Process Engineering à l'ETH Zurich, Institute of Applied Mechanics à l'University of Stuttgart, Département de Sciences des Matériaux de Politecnico di Torino, Université Polytechnique de Saint Petersburg.

Partenariats industriels envisagés

- SNCF, fabrication additive
- IFPEN, problématiques de corrosion
- Arcelor, mise en forme des métaux
- PSA, moteurs électriques et fabrication additive
- Andra, couplages fluide/roche
- EDF, stockage d'énergie
- B&D, injection de médicaments
- AddUp, fabrication additive
- SafranTech, fabrication additive

Et plus généralement les

- Industries automobile et aéronautique pour la fabrication additive
- Industries pétrolière et nucléaire pour les problématiques de corrosion
- Industries en lien avec les énergies renouvelables pour le photovoltaïque

4) Interfaces et transformations de phase

Enjeux :

Les interfaces sont multiples : interphases, joints de grains, surfaces de couches minces, interfaces microstructurées, etc. Les enjeux aussi.

- La compréhension des propriétés mécaniques et physico-chimiques des **géomatériaux polyphasés** et des **métaux** à l'échelle macroscopique passe par une modélisation des interphases et interfaces à l'échelle microscopique. Les applications associées concernent les procédés d'élaboration, l'étude de la plasticité cristalline, la production et le transport d'hydrocarbures et le stockage d'énergie.
- La **structuration des surfaces** de couches minces semi-conductrices sous contraintes élastiques par auto-organisation de nanostructures telles que les boîtes, fils ou puits quantiques passe par une modélisation multiphysique de la dynamique des marches atomiques et des instabilités morphologiques de croissance.
- L'amélioration des propriétés électroniques des cellules photovoltaïques, des transistors en couches minces, et des diodes électroluminescentes organiques par **contrôle de leurs microstructures** passe par une modélisation de la cinétique des interphases qui s'y forment en cours de dépôt.
- L'obtention de **conditions de transmission effectives** en électromagnétisme, en acoustique, en élasticité et en mécanique des fluides passe par l'**homogénéisation d'interfaces microstructurées**.

Les interfaces jouent enfin un rôle clé dans les mécanismes de croissance par fabrication additive et dans le calcul des structures à l'échelle macroscopique avec conservation des informations microstructurelles par descripteurs statistiques.

Axes de recherche :

Le premier axe dans ce domaine concerne le développement d'essais mécaniques adaptés à petite échelle impliquant les traitements et chargements thermiques adaptés, les observations in situ adéquates, des mesures de champs et des mesures de propriétés de transport.

Le second axe réside dans l'étude des **instabilités morphologiques** de couches minces semi-conductrices inorganiques sous contraintes, qui jouent un rôle crucial dans les phénomènes de dépôt et de croissance.

Ceci implique en parallèle d'étudier les **évolutions hors-équilibre des interphases** dans les couches minces de semi-conducteurs organiques.

Enfin, il s'agira de développer les techniques d'analyse par **homogénéisation des interfaces microstructurées** pour les métamatériaux élastiques, acoustiques et électromagnétiques et pour les études sismiques. Plus généralement, il sera important de développer des techniques **d'homogénéisation statistique** des énergies et des dissipations aux joints de grains afin de pouvoir développer des modèles à l'échelle des milieux continus

Partenaires :

ENSTA, LPICM, LPMC, MSSMAT, ENS, EPSCI, UMET, Navier, LMA, Université de Pise, University of Kentucky (USA).

5) Mécanique en lien avec la médecine et la biologie

Enjeux :

La mécanique des systèmes vivants se particularise par la nécessité de décrire les couplages avec la réponse biologique (processus biochimiques, contraction moléculaire, remodelage, croissance, etc.).

Ces couplages imposent des **approches multi-échelles**, d'abord **en espace** car la biologie se produit de l'échelle de l'individu à l'échelle micrométrique (cellulaire) ou même inférieure (moléculaire) pour des objets de taille macroscopique. De plus, il faut une **approche multi-échelle en temps**, les réponses biologiques à la même sollicitation pouvant s'étaler sur des gammes de temps très diverses : de quelques microsecondes ou secondes pour des réponses biochimiques à des jours ou des mois pour des processus de croissance et de remodelage.

Une autre spécificité de l'étude de systèmes vivants est dans l'**exploitation des données** disponibles. On dispose souvent de grandes quantités de données, en particulier grâce au progrès fulgurant des techniques d'imagerie, mais l'expérimentation sur le vivant est sujette à de fortes contraintes (différences in-vivo/ex-vivo, invasivité minimale des données médicales, etc.). Il faut donc développer des approches d'**assimilation de données** et d'**identification** pour exploiter au mieux l'ensemble des données disponibles, souvent complexes. De plus, il convient de développer des **protocoles expérimentaux** adaptés qui permettent de mesurer l'information pertinente et de valider les modèles développés.

Au-delà de ces enjeux scientifiques, cet axe de recherche présente des **enjeux médicaux et sociétaux**. Il vise à développer des outils d'aide au diagnostic, au pronostic et à la décision. Par-là, il cherche à optimiser les traitements, voire à proposer des changements complets d'approches (suivi à domicile, etc.). Cela implique un travail en forte collaboration avec le milieu hospitalier mais aussi avec l'ensemble du milieu industriel incluant un large panel de start-ups.

Axes scientifiques

Modélisation de tissus et d'organes

Comme souligné en introduction, ce type de modélisation nécessite par nature une démarche multi-échelles en espace, voire également en temps, et comporte par ailleurs souvent des couplages multi-physiques. Les travaux engagés dans le laboratoire depuis plus d'une décennie sur le cœur et la peau, en particulier, ont déjà atteint une certaine maturité, mais donnent également lieu à de multiples extensions et raffinements, notamment dans l'exploration de nouvelles constantes de temps ou d'espace. Par ailleurs de nouveaux sujets d'études, comme le poumon, ont été abordés plus récemment, avec des défis comparables.

Modélisation système

La modélisation d'un organisme implique de prendre en compte non seulement chacun de ses constituants, mais également de façon cruciale la façon dont ceux-ci interagissent à travers des couplages dynamiques. On peut citer comme exemple prototypal le système cœur- vaisseaux, auquel on peut adjoindre les poumons. Dans un tel contexte, il est indispensable de prendre en compte les couplages à la fois pour le monitoring ou le diagnostic médical, car les moyens de mesure étant intrinsèquement limités le couplage permet une exploitation indirecte des mesures. On vise aussi l'aide à la décision via la prévision par modélisation, par exemple pour anticiper ou optimiser l'effet d'un médicament. Cet axe comporte donc des questions de modélisation directe, mais également de réduction de modèle respectant la physique et la dynamique essentielle de chaque composante du système.

Modélisation étendue à la mesure

En amont des problèmes inverses exploitant les mesures, des questions de modélisation fine apparaissent pour modéliser la mesure elle-même, bien entendu en interaction avec le système considéré. On peut mentionner l'exemple de l'élastographie des tissus, qui sollicite des comportements dynamiques à très petites échelles, ou encore la sismocardiographie pour laquelle une modélisation du couplage cœur / structures environnantes est nécessaire.

Ingénierie biomédicale par modélisation

Il s'agit ici de prendre en compte des questions médicales, typiquement liées à des pathologies spécifiques, ne nécessitant pas de formuler des modèles nouveaux en tant que tels, mais de combiner et / ou adapter des ingrédients de modélisation pour prendre en compte la spécificité. On peut alors exploiter le modèle pour éclairer le médecin dans son appréhension des phénomènes en jeu, mais également pour l'aider dans sa stratégie thérapeutique en simulant le traitement (par exemple pharmacologie, chirurgie, pacemaker, etc.) et son impact.

Expérimentation

Les enjeux en expérimentation sont en relation étroite avec ceux de la modélisation, et notamment de ses caractéristiques multi-échelles. On souhaite donc en particulier ici obtenir des informations conjointes sur la microstructure (peau, muscle, etc.) et sur le comportement au niveau macroscopique.

Interfaces haptiques

L'enjeu est ici de comprendre comment la dynamique d'une interface haptique peut favoriser son contrôle par un opérateur humain. Le paradigme choisi (claviers musicaux) est à la fois très exigeant et un verrou dans le développement d'une large classe de synthétiseurs musicaux. Le projet réunit un développement technologique (claviers semi-actifs) et des expériences de psycho-haptique.

Partenaires :

Académiques : BME Institute (notamment LadHyX et LOB), équipes-projets Inria Reo et Carmen, ETH Zurich, Institut Langevin, Univ. Florence (physiologie)

Cliniques : Lariboisière, Henri Mondor, KCL-St-Thomas, UTSW Dallas, Marie Lannelongue

Industriels : CEA-LIST, Dassault-Systèmes, Philips...

Financements :

Projets ANR et européens, SNF (via ETH), AP-HP (postes d'accueil), UTSW

6) Observation / Identification

Enjeux

L'évolution récente des techniques d'observation et de mesure permet d'acquérir des grandes quantités d'informations sous la forme des images, des séries temporelles des signaux, etc. Nous devons imaginer des méthodes originales et novatrices permettant d'interpréter ces données nombreuses de la manière la plus efficace possible, et si possible en temps réel pour certaines d'entre elles. Ces méthodes s'appuieront naturellement sur des outils de traitement des données efficaces, de réduction de modèles (asymptotique ou méthodes numériques), mais aussi sur la définition de méthodes d'estimation originales, telles que les méthodes séquentielles.

Axes scientifiques

Il est naïf de penser qu'un traitement des données direct par des techniques de filtrage, segmentation ou encore statistique etc. puisse être appliqué en l'absence d'un modèle physique adéquate. Par contre, les données sous forme d'images sont de nature très spécifique et vivent dans des espaces mathématiques différents des espaces de définition des modèles. L'enjeu est donc de pouvoir extraire une information pertinente de ces images en combinant des outils de corrélation, de segmentation, d'extraction de formes ou de pattern, mais aussi en couplant ces informations extraites au modèle. Nous envisageons donc de proposer des méthodes qui permettent de **fusionner ces données** à travers de la définition d'un modèle compatible avec ces physiques et ces données. En d'autres termes, le modèle est l'élément structurant les mesures entre elles.

La confrontation des modèles avec les données observées se heurte de plus à des multiples **problèmes d'incertitude** ou d'**incompatibilité** entre les espaces des modèles d'une part et des observations d'autre part. Par exemple, les **contours** des objets dans les modèles mathématiques représentant des organes ou encore des structures imprimées par fabrication additive sont différents des contours des objets réels correspondants. La nature de cette différence et l'incertitude induite dans la modélisation ne peut pas être prise en compte avec des variations statistiques des paramètres habituels. On peut imaginer qu'une technique qui peut répondre à cette problématique est la dérivée de forme, telle qu'utilisée dans l'optimisation de forme ou topologique. Cette même approche est susceptible de traiter l'impact des défauts locaux qui disparaissent dans les processus d'homogénéisation mais qui sont souvent la cause de la défaillance par fatigue, rupture ou flambage des structures et qu'il faut donc étudier.

Les applications pratiques, demandent également un **traitement en temps réel** des séries temporelles caractérisant des grandeurs locales mesurées en continu. L'enjeu est donc de pouvoir extraire une information pertinente de ces mesures en utilisant des modèles simples et robustes combinant des techniques de traitement du signal et de contrôle.

Actions

Le LMS a été un membre actif dans ces problématiques, a développé différentes techniques et a une bonne base de connaissance pour travailler dans ce domaine. Le développement de ces techniques s'appuie sur une collaboration transversale impliquant les acteurs de NewUni, et nécessitera de développer des outils mathématiques et numériques adaptés.

Positionnement et Partenaires

Le positionnement dans cette problématique passe d'une part par les collaborations avec les fournisseurs établis des données : cliniques, industriels, ... et d'autre part par les équipes avec lesquelles on collabore. Dans ces dernières, et au delà de NewUni, on peut citer: Stéphane Avril (Saint-Etienne), Michel Bornert (Navier), Cédric Bellis (LMA Marseille), ...

ANNEXES

- Annexe 1 :** Fiche administrative unité au 30 juin 2018 signée par le Directeur d'unité
- Annexe 2 :** Liste des équipements et des plateformes du LMS.
- Annexe 3 :** Organigramme fonctionnel du LMS 2018
- Annexe 4 :** Sélection des productions et des activités de recherche par catégorie
- Annexe 5 :** Bilan social 2017 et Bilan budgétaire 2017
- Annexe 6 :** Liste invités séminaires
- Annexe 7 :** Liste publications (2013-2018)