MINES ParisTech – CENTRE DES MATÉRIAUX
Pôle de recherche
MIcrostructure, Mécanique et EXpérimentation

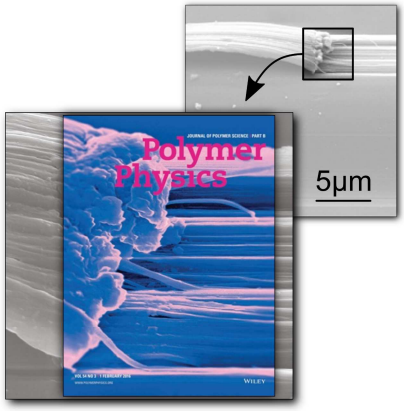
• **Responsables scientifiques:** J. Besson, M. Boussuge, S. Cantournet, L. Corté, J. Crépin, C. Duhamel, V. Esin, A.-F. Gourgues-Lorenzon, S. Joannes, A. Köster, L. Laiarinandrasana, V. Maurel, T. Morgeneyer, L. Nazé, H. Proudhon

• **Chercheurs associés :** A. Bunsell, Y. Madi, A. Pineau, L. Rémy, A. Thionnet

• **Responsables techniques :** Y. Auriac, K . Barrière, R. Clément, S. Dang, S. Gailliègue, J. Heurtel, A. Meddour, M. Rambaudon, J. Schneider

Présentation

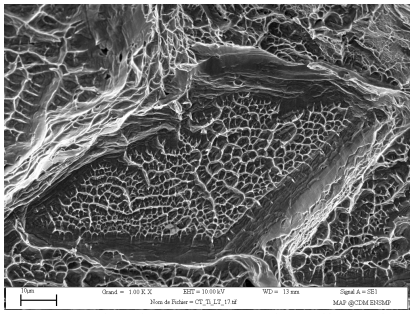
Le pôle "Microstructure, Mécanique et Expérimentation" (Mimex) se positionne sur tous les types de matériaux: i) Métaux et alliages métalliques; ii) Polymères et composites à matrices polymères; iii) Céramiques et réfractaires. L'identification des mécanismes de déformation, d'endommagement et de rupture nécessite le concours des techniques d'observations microstructurales, à différentes échelles. Par exemple, pour les matériaux composites : de l'échelle d'un sous-système (quelques dizaines de centimètres) à l'échelle des mono-filaments de quelques micromètres de diamètre. La pertinence des paramètres physiques à prendre en compte, pour chaque classe de matériau, repose sur une étude systématique de la taille du volume d'intérêt expérimental ainsi que des données stochastiques dans ce volume. Une interaction permanente est instaurée entre l'expérimentation et la modélisation à l'échelle du milieu continu depuis la conception des essais jusqu'au calcul de structure, le but étant de cibler des essais dédiés en accord avec la problématique industrielle et scientifique posée. Le pôle Mimex met ainsi en œuvre une expérimentation et une modélisation multi-échelles faisant le lien entre l'approche locale (à l'échelle de la microstructure) et l'approche globale (à l'échelle macroscopique). L'intégration dans les outils de calcul de (micro)structure est réalisée en coopération avec les numériciens du Centre (SIMS) et de laboratoires d'autres institutions.



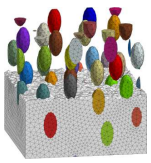
Pelage de la surface d'une fibre de Kevlar® observée au MEB [Wollbrett-Blitz et coll.] révèlant une microstructure fibrillaire complexe à l'origine du comportement des structures fibreuses et composites.

Microstructures

L'analyse des mécanismes des phénomènes physiques mis en jeu nécessite le recours intensif aux observations microstructurales, à différentes échelles et à leur description quantitative, afin d'introduire les paramètres physiques pertinents dans l'approche proposée en mécanique expérimentale et théorique. L'évolution microstructurale au cours d'un chargement thermomécanique (lors de la mise en œuvre ou en cours de service) est mise en avant. Elle permet ainsi: i) le développement de matériaux nouveaux; ii) l'étude de changements de phases; iii) l'analyse de phénomènes de vieillissement en cours de service (oxydation, endommagement,...)



Rupture ductile en terrasses d'un alliage de titane TRIP/TWIP à haute capacité d'écrouissage et haute ténacité - Collaboration avec Chimie ParisTech.(Coll. PSL)

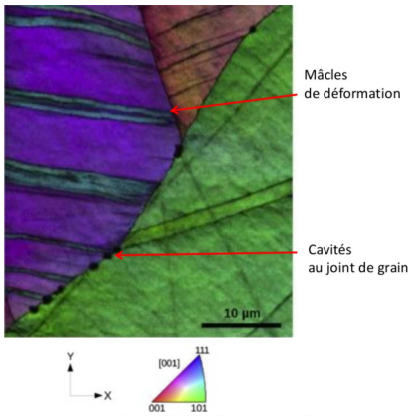


Centre des Matériaux, 63-65 rue Desbruères, BP 87, 91003, Évry Cedex
Tél : 33 1 60 76 30 00 Fax : 33 1 60 76 31 50 http://www.mat.mines-paristech.fr

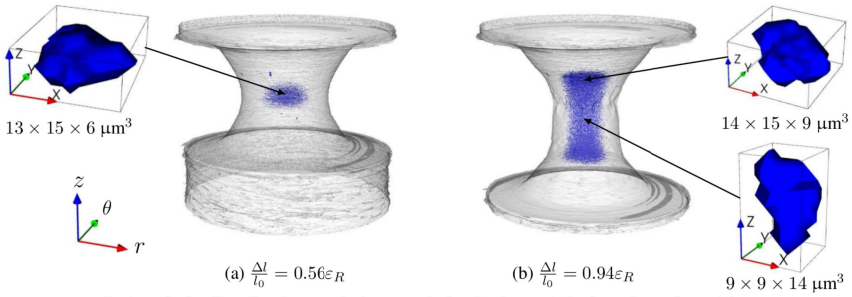
MINES ParisTech – CENTRE DES MATÉRIAUX
Pôle de recherche
MIcrostructure, Mécanique et EXpérimentation

Mécanique expérimentale

Mettant l'accent sur l'évolution de la microstructure en cours de chargement thermomécanique, l'expérimentation se développe sur la constitution de base de données à l'échelle de la microstructure. La mise en place d'essais in situ en tomographie/laminographie a permis d'accéder aux mécanismes de déformation en volume. Selon le problème abordé, le pôle Mimex propose et conçoit deux types d'essai mécanique. D'une part, des essais simples exploitables de manière analytique en optimisant la géométrie des éprouvettes et l'instrumentation pour une implémentation chez nos partenaires industriels afin d'améliorer une méthodologie expérimentale. D'autre part, des essais mécaniques complexes avec des instrumentations et de la modélisation poussées, simulant un chargement réel (cycle moteur d'avion d'une aube de turbine) sur structure industrielle. Ces essais peuvent se faire sous environnement contrôlé (air, atmosphère, humidité,…) voire sous environnement sévère tel que la corrosion sous contrainte, en étroite collaboration avec des partenaires équipés pour des essais spécifiques.



Cartographie EBSD d'un joint de grain couvert de cavités dans un acier 316L après relaxation à 550 °C pendant 1455 h. Les macles de pré-déformation du matériau, à l'ambiante sont également visibles. (Thèse H. Pommier)



Evolution de la distribution et de la morphologie de cavités dans le Polyamide 11, observée par essai in-situ en tomographie : a) A la fin de l'adoucissement ; b) avant la rupture. (Thèse P.A. Poulet)

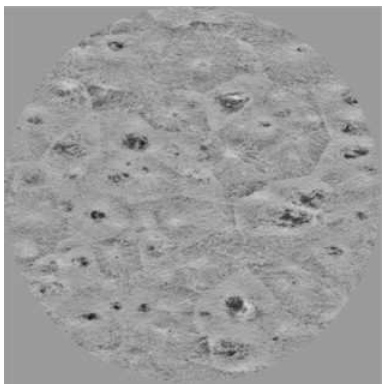
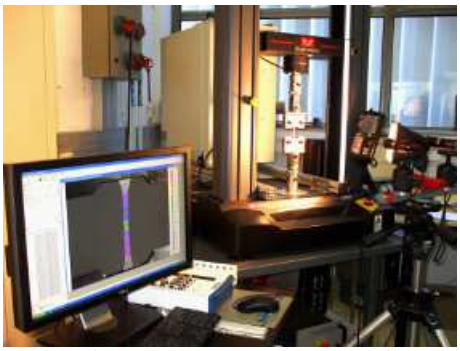
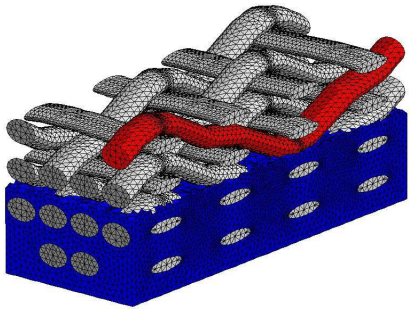


Image tomographique à très haute résolution (1px=60nm) d'une microstructure sphérolitique déformée d'un Polypropylène isotactique (Coll. ESRF -MA1647)



Essai mécanique avec le dispositif de corrélation d'images numériques 2D ; Enceinte thermostatique pour contrôler la température de l'essai, 50 % d'humidité relative contrôlée dans la salle.



Maillage d'une cellule périodique d'un matériau composite tissé interlock angle 2.5D (Thèse Roirand)

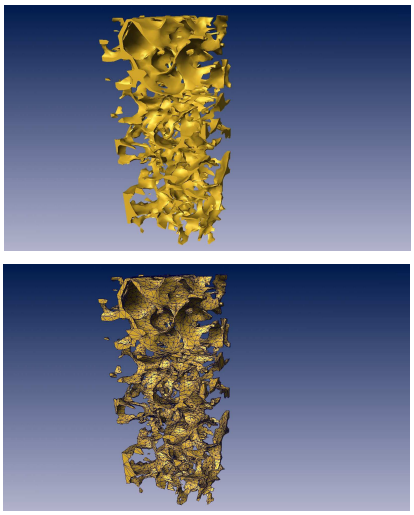
MIMEX

Centre des Matériaux, 63-65 rue Desbruères, BP 87, 91003, Évry Cedex
Tél : 33 1 60 76 30 00 Fax : 33 1 60 76 31 50 http://www.mat.mines-paristech.fr

MINES ParisTech – CENTRE DES MATÉRIAUX
Pôle de recherche
MIcrostructure, Mécanique et EXpérimentation

Mécanique théorique et numérique

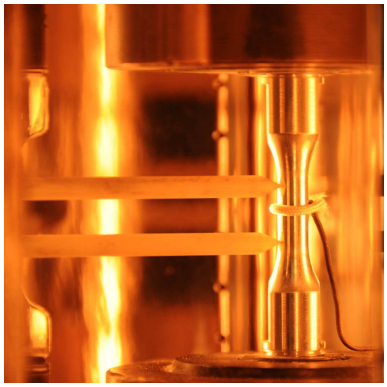
En interaction avec l'étude de l'évolution de la microstructure et la mécanique expérimentale, le pôle met en œuvre les théories basées sur la mécanique des milieux continus, l'homogénéisation, la mécanique de l'endommagement et la mécanique de la rupture. La modélisation fine des phénomènes physiques se décline ainsi à deux échelles : l'approche globale se basant sur les observables macroscopiques dédiée aux pièces industrielles en service ; l'approche locale appuyée par les mécanismes à l'échelle de la microstructure. Cette dernière amène le pôle à effectuer des calculs de microstructure propices aux échanges avec des élaborateurs de matériaux. Une interaction forte se fait avec l'équipe SIMS pour implémenter sur le code par éléments finis du Centre (Z-set) des lois de comportement à diverses échelles, couplées ou non (post-traitement) avec l'endommagement.



Comportement : Matériau bi-phasé. Phase vitreuse identifiéepar tomographie X, reconstruite par traitement d'image 3D.Maillage de la phase vitreuse(thèse K. Madi, Prometheref).

Méthodologie

L'approche développée au sein du pôle Microstructure, Mécanique et Expérimentation s'appuie sur la mise en évidence et l'observation de phénomènes physiques sur la base desquels des modèles sont développés. Ces modèles sont ensuite validés sur des éprouvettes de laboratoire, avant d'être utilisés pour optimiser le comportement de nouveaux matériaux pour les élaborateurs et prédire la durée de vie de composants industriels pour les exploitants. L'expertise des mécanismes physiques s'adresse à tout type de matériaux (alliages métalliques, polymères, composites à matrices polymères, céramiques et réfractaires) et à toutes les étapes de la « vie » de ces matériaux. La compréhension des phénomènes physiques résulte d'un fort couplage entre, d'une part, des moyens de caractérisation mécanique classiques (sollicitations mécaniques monotones, fatigue, fluage), en environnement contrôlé (-196 °C à +2000 °C), soit par le développement de moyens spécifiques (dilatométrie sous vide à très faible charge, machine de traction – torsion, dosage en temps réel de l'austénite résiduelle, Gleeble), et d'autre part, l'utilisation des techniques d'observation structurale (microscopie optique et électronique, EBSD, FIB, tomographie /laminographie). Afin de reproduire au mieux certaines conditions rencontrées en service, une plate-forme d'essais jusqu'à 25 m/s avec mise en température (– 130 °C à + 300 °C) permet l'étude du comportement et de la rupture sous sollicitations rapides.



Essai à haute température sur éprouvette cylindrique placée dans un four à lampes (A. Koster)

(Thèse François Xavier HOCHE)

Centre des Matériaux, 63-65 rue Desbruères, BP 87, 91003, Évry Cedex
Tél : 33 1 60 76 30 00 Fax : 33 1 60 76 31 50 http://www.mat.mines-paristech.fr

MINES ParisTech – CENTRE DES MATÉRIAUX
Pôle de recherche
MIcrostructure, Mécanique et EXpérimentation

SAVOIR FAIRE

Examens microstructuraux

- Microscopie électronique à balayage : microstructures, surfaces de rupture, microtextures en EBSD
- Microscopie électronique en transmission : microstructures, identification de phases par diffraction, microstructures de déformation
- Tomographie, Laminographie, FIB, diffraction X

Essais mécaniques complexes sur une large gamme de température

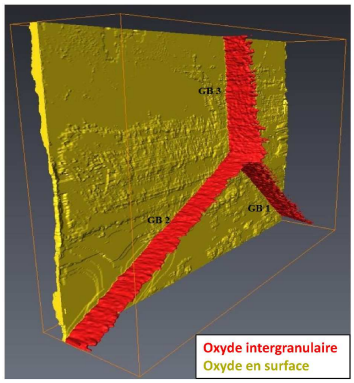
- Sous environnement contrôlé (air, vide, atmosphère, humidité...)
  - Traction ou compression monotones en quasi-statique ou dynamique, en uniaxial ou en biaxial
  - Essais cycliques complexes simulant un chargement réel (ex : cycle moteur d'avion d'une aube de turbine)
  - Essais de fissuration: fatigue thermo-mécanique, fluage rupture, ténacité
- Corrélation d'images numériques (2D ou 3D), y compris à haute température

Modélisation et intégration numérique des modèles

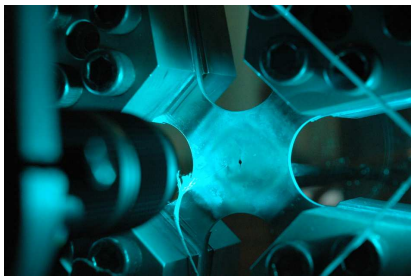
- Développement de modélisations robustes sur des bases d'essais larges sur tous les matériaux étudiés
- Développement de modèles à base physique prenant en compte des phénomènes allant de la physico-chimie à l'endommagement macroscopique
- modélisation de l'endommagement en conditions isothermes et anisothermes en lien étroit avec les pôles SIMS et SIP

Moyens techniques spécifiques

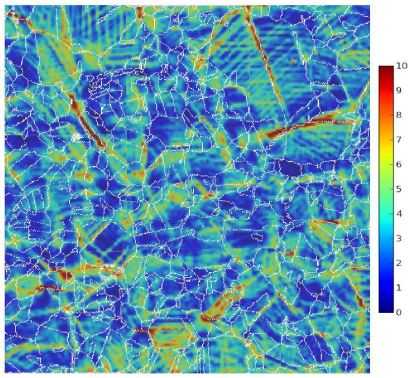
- Machines d'essais mécaniques : traction, compression, fluage, relaxation, fatigue...
- Bancs de fatigue thermique (effet Joule et chauffage radiant)
- Banc d'oxydation statique ou cyclique sans charge (fours à lampes)
- Enceinte pour la réalisation d'essais sous vide (fissuration, fatigue...)
- Suivi de l'endommagement / fissuration par méthode électrique ou optique
- Développement d'essais mécaniques in situ pour la tomographie / laminographie
- Co-conception de machines et éprouvettes avec l'atelier mécanique du Centre des Matériaux
- Accès aux grands instruments : synchrotron Soleil, ESRF, ANKA, FIB



Reconstruction 3D par MEB/FIB de joints de grains oxydés dans un alliage base nickel. (oxyde intergranulaire en rouge, couche d'oxyde de surface en jaune). Coll. Equipex MATMECA



Propagation de fissure sous sollicitation multiaxiale à haute température d'un superalliage base cobalt. (Thèse M. TRABELSI)



Champs de déformation superposés à la cartographie de joints de grains d'un acier 316L irradié après essai de traction à 360°C en milieu aqueux haute pression. (Thèse M. Miller) Chaire AREVA

MIMEX

Centre des Matériaux, 63-65 rue Desbruères, BP 87, 91003, Évry Cedex
Tél : 33 1 60 76 30 00 Fax : 33 1 60 76 31 50 http://www.mat.mines-paristech.fr