



CENTRE DES MATERIAUX  
PIERRE-MARIE FOURT

# CENTRE DES MATÉRIAUX

## PIERRE-MARIE FOURT



MINES PARIS



## LES MISSIONS

**Le Centre des matériaux** est un centre d'enseignement et de recherche créé en 1967 par l'École des mines de Paris et ARMINES sur le site industriel de SNECMA aujourd'hui société du Groupe SAFRAN. Son effectif actuel est de 140 personnes dont 30 enseignants-chercheurs, 45 ITA et 55 doctorants et visiteurs. Ses activités concernent tout type de matériaux d'intérêt industriel. Une part importante des projets est réalisée en collaboration avec de grands groupes industriels, mais de nombreux travaux concernent les PME-PMI. Ses activités relèvent de trois grandes missions : l'enseignement, la recherche scientifique et technique et la valorisation industrielle des produits de cette recherche.



• LE CENTRE DES MATÉRIAUX.

## Formations supérieures d'excellence en sciences et génie des matériaux

- cycle des élèves ingénieurs de l'École des mines de Paris;
- master recherche **Matériaux pour les structures et l'énergie** en partenariat avec Paris VI, Paris XI, Paris XII, EP, ECP, ENSCP et l'INSTN;
- mastère spécialisé sur le **Comportement des matériaux et dimensionnement des structures (COMADIS)**;
- doctorat de l'École des mines de Paris en **Sciences et génie des matériaux** (École doctorale **Sciences des métiers de l'ingénieur** en partenariat avec l'ENSAM);
- formation continue en relation avec le CACEMI et cycles d'enseignement de l'Université d'Évry.

Plus de 400 thèses de doctorat ont ainsi été préparées et soutenues depuis 1967. Le Centre entretient aussi des relations suivies avec de nombreuses universités étrangères (MIT, Berkeley, universités européennes et asiatiques).



• ENSEIGNEMENTS

## Recherche scientifique et technique

Le centre est une unité mixte de recherche du CNRS (UMR 7633 du département des Sciences pour l'Ingénieur). Son ambition est de réaliser une recherche scientifique du meilleur niveau international sur des thèmes d'intérêt industriel. Il appartient à la Fédération Francilienne des Laboratoires en Mécanique et Matériaux dont l'objectif est de coordonner les initiatives des laboratoires de l'Île de France travaillant sur cette thématique. Il entretient des rapports étroits avec les grands établissements de recherche (CEA, ONERA) et les centres techniques (CETIM). L'École des mines de Paris/ARMINES, le Génopole et l'INSERM ont constitué à Évry un pôle commun de microscopie et d'imagerie de site. Dans ce cadre, les partenaires, fortement aidés par la Région, ont fait l'acquisition d'un nouveau microscope électronique en transmission.

Ses chercheurs de culture internationale maîtrisent un large domaine de compétences scientifiques et techniques (chimie, physique, mécanique, ...). Ils disposent d'un ensemble important d'équipements scientifiques (dispositifs d'élaboration, de traitement et d'analyses physico-chimiques et microstructurales, machines d'essais mécaniques et de calcul numérique...) servis par des personnels techniques hautement qualifiés.

Son activité de recherche est caractérisée par un étroit couplage entre l'approche expérimentale et la modélisation des phénomènes. Les résultats sont de plus en plus fréquemment intégrés dans des codes de calculs numériques. En particulier le code « Z-set » désormais utilisé dans de nombreux centres de recherche et bureaux d'études publics et industriels.

Le Centre des Matériaux est un acteur majeur des grandes initiatives de recherche nationales (ANR, PREDIT, pôles de compétitivité, Association des Structures de Recherche sous Contrat...) ou internationales. Il bénéficie en particulier de l'aide de la représentation permanente d'ARMINES auprès de la CEE et son appartenance à l'European Association of Research and Technology (EARTO).

Le Centre Laser Franco Allemand Fraunhofer ILT (CLFA) est implanté au Centre des Matériaux. L'objectif du partenariat est de développer les applications du LASER pour la mise en oeuvre des matériaux.

## La valorisation

La volonté permanente de valorisation des résultats des recherches est illustrée par son implantation dans un site industriel et par le fait que la moitié de ses ressources financières provient de contrats de recherche conclus avec des partenaires industriels (3,6 M en 2004). Les projets avec ces derniers entrent généralement dans des accords-cadres qui permettent de mobiliser les moyens humains et matériels à moyen et long terme et sont donc propices aux formations doctorales. Une attention toute particulière est cependant réservée aux besoins de recherche des PME/PMI qui peuvent bénéficier de l'ensemble des compétences et des moyens scientifiques du centre selon des formules contractuelles adaptées à leurs besoins en concertation notamment avec les CRITT.

Le centre bénéficie en permanence des moyens administratifs, juridiques et financiers d'ARMINES pour la gestion des personnels autres que fonctionnaires, des contrats de recherche et de la propriété intellectuelle des brevets et des codes. Avec les contrats industriels de recherche et les brevets, la diffusion et l'exploitation du code de calcul « Zset » représente désormais une part très significative de la valorisation industrielle des travaux scientifiques du Centre des Matériaux.



● SUPERALLIAGE.



● DISQUE DE TURBINE  
(DOC. TURBOMECA).



# MINES DE PARIS — CENTRE DES MATÉRIAUX

## ANALYSES, MICROSCOPIES, IMAGES (AMI)

- **MICROSCOPIE, ANALYSE** : FRANÇOIS GRILLON ;
- **ANALYSE MORPHOLOGIQUE** : FRANK N'GUYEN ;
- **RADIOCRISTALLOGRAPHIE X** : DANIEL PACHOUTINSKY ;
- **MICROSCOPIE EN TRANSMISSION** : ALAIN THOREL.

## PRÉSENTATION

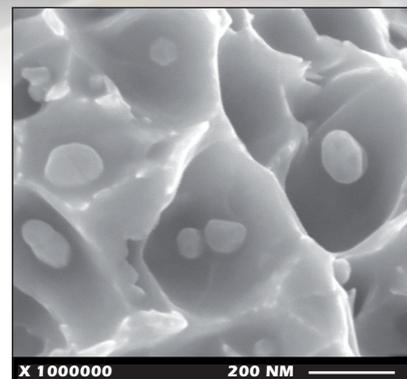
**L'équipe Analyses, Microscopies, Images** regroupe les moyens communs d'observation et d'analyse du laboratoire.

La compétence, l'expérience et le professionnalisme du personnel, alliés à un parc de matériel performant, permettent de supporter l'ensemble de l'activité de recherche du centre et d'assurer des expertises pour les entreprises.

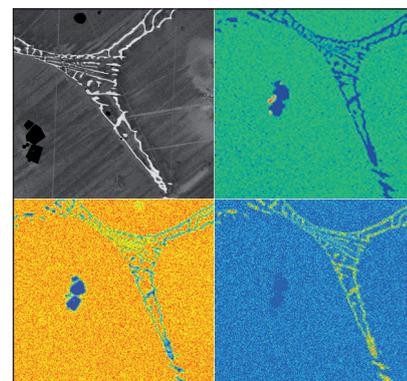
- Préparation de tout type de matériaux métalliques, céramiques, polymères, élastomères et observations en microscopie optique ;
- Caractérisation mécanique par mesure de dureté (micro ou macro) ;
- Caractérisation des structures, de la morphologie et de la composition par microscopie électronique à balayage (MEB) et microanalyse X ;
- Préparation de lames minces (amincissement ionique, électrolytique, mécanique par tripode), observation et nano-analyse X et EELS en microscopie électronique en transmission (MET), structure atomique par METHR ;
- Radiocristallographie X : Identification de phases, des textures, détermination des contraintes résiduelles, fonction d'orientation des polymères, mesures des longues périodes (SAXS), Laue ;
- Morphologie mathématique appliquée à l'analyse et à la simulation d'images 2D et 3D.

## MOYENS

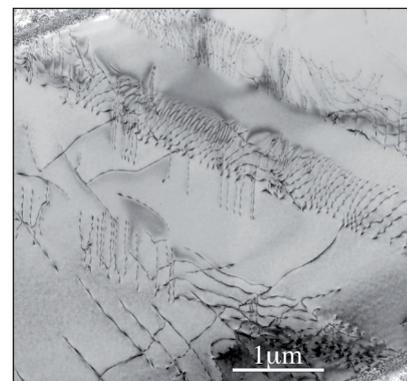
- Matériels de préparation métallographique ;
- Microscopes optiques LEICA et ZEISS ;
- Microduromètre Buehler OmniMet MHTSA (0,5g à 2 kg) ;
- MEB LEO -1450VP - SEM 240 ;
- MEB ZEISS - Gemini DSM 982 ;
- Microsonde de Castaing CAMECA SX50 ;
- MET FEI - EM430 (300 KV) ;
- MET FEI - Technai F20 (200 KV) ;
- Générateurs RX SIEMENS ;
- Calculs sur cluster du Centre des matériaux.



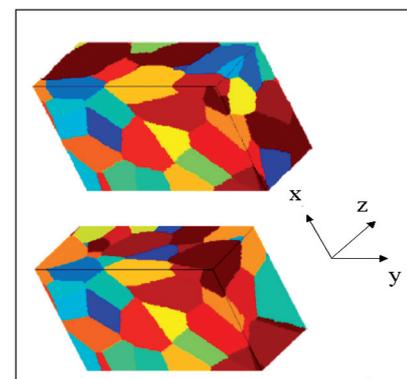
• IMAGE ÉLECTRON SECONDAIRE HAUTE RÉOLUTION.



• IMAGE ÉLECTRONS BSE ET IMAGES X (échelle: 20  $\mu\text{m}$   $\perp$ ).



• DISLOCATIONS DANS TI-6242 DÉFORMÉ À 400 °C.



• SIMULATION TYPE VORONOÏ CONTRAINT.



AMI



# MINES DE PARIS — CENTRE DES MATÉRIAUX

## ATELIER-INSTRUMENTATION ÉLECTRONIQUE (ATIE)

- **ATELIER** : MICHEL ROUSSELOT ;
- **INSTRUMENTATION ÉLECTRONIQUE** : JOSEPH VALY.

### PRÉSENTATION

L'équipe ATIE est constituée de deux entités complémentaires :

- L'atelier de mécanique **AT**
- L'instrumentation électronique **IE**

L'atelier de mécanique réalise des montages mécaniques (machines d'essai mécanique, fours à image trilobés...), usine tous types d'éprouvettes. Le personnel est composé d'ouvriers qualifiés polyvalents qui peuvent travailler sur n'importe quelle machine-outil.

### MOYENS

- Fraiseuses, tours, rectifieuses planes et cylindriques dont certaines à commande numérique, machines d'électroérosion par enfonçage
- Matériel de contrôle, découpe, formage, soudage à l'arc, TIG et brasage

Une étroite collaboration entre l'atelier et l'équipe technique « Instrumentation Electronique (IE) » permet la conception et la réalisation d'ensemble complet machine/instrumentation.

L'instrumentation électronique conçoit et réalise en relation avec les groupes de recherche après avoir évalué les besoins en instrumentation et en métrologie :

- L'électronique de machines d'essais mécaniques réalisées à l'atelier
- Les électroniques de capteurs (jauges, LVDT, )
- Les asservissements (température, force, déplacement)
- Des appareils de mesure spécifiques
- L'étude et la réalisation de capteurs spéciaux

Elle anime également une cellule d'assurance – qualité, gère un parc de capteurs étalons et assure la maintenance des appareils électroniques.

**Exemple de réalisation :** Suiveur de propagation de fissure, destiné initialement à suivre la propagation d'une fissure dans un matériau métallique par mesure de potentiel électrique, cet appareil est utilisé aussi pour mesure la résistivité des matériaux métalliques (résolution  $10^{-8} \Omega$ ).



• FRAISEUSE À COMMANDE NUMÉRIQUE.



• MACHINE DE FATIGUE POUR FIBRES.



• MACHINE DE TRACTION, TORSION.



• SUIVEUR DE PROPAGATION DE FISSURE.



ATIE



# MINES DE PARIS — CENTRE DES MATÉRIAUX

## COMPOSITE, ASSEMBLAGE, MODÉLISATION

• **RESPONSABLES SCIENTIFIQUES**

: ANTHONY BUNSELL, ANNE PIAUT,  
JACQUES RENARD, ALAIN THIONNET.

• **RESPONSABLES TECHNIQUES**

: YANN AURIAC, YVES FAVRY,  
JEAN-CHRISTOPHE TEISSEDE.

## PRÉSENTATION

L'équipe CAM (Composite, Assemblage, Modélisation) a pour principales activités la caractérisation expérimentale, la modélisation et la simulation numérique du comportement des matériaux et des structures composites ainsi que des assemblages multi-matériaux.

L'équipe est capable de traiter des études, aussi bien, à l'échelle de la microstructure, motivées par des physico-chimistes, qu'à l'échelle de la structure, motivées par des mécaniciens. Son objectif est de déterminer, à partir d'une parfaite connaissance de chacun des constituants, le comportement mécanique des structures industrielles composites, soumises à des sollicitations mécaniques et environnementales complexes.

Pour ce faire elle développe toutes les techniques expérimentales et numériques nécessaires à la résolution des problématiques industrielles sur tous types de matériaux.

L'équipe CAM a ainsi développé en particulier des compétences dans les domaines de :

- La caractérisation et la modélisation du comportement mécanique des fibres de  $-180$  à  $1600^{\circ}\text{C}$ ,
- L'étude expérimentale et la modélisation du comportement des matériaux composites stratifiés,
- La caractérisation et la modélisation des assemblages, et le calcul de structures de pièces industrielles en composite.

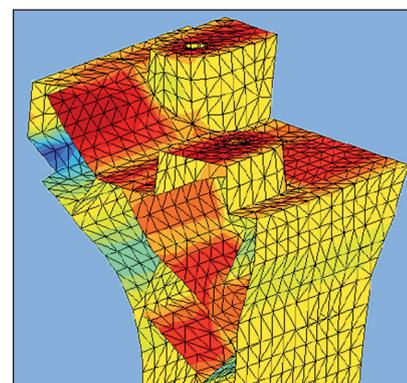
La généralité des outils et des méthodes développés permet leur transfert à toute étude et développement sur les matériaux du futur ainsi qu'à la conception de structures multi-matériaux de plus en plus complexes.



• RUPTURE EN FATIGUE D'UNE FIBRE POLYESTER.



• FISSURATION DANS UN CARBONE/RÉSINE.



• MODÉLISATION D'UNE PIÈCE EN COMPOSITE INJECTÉE EN PP/FIBRE DE VERRE.



• CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DE RÉSERVOIRS EN CARBONE/RÉSINE.

## SAVOIR-FAIRE

### Caractérisation et modélisation du comportement mécanique des fibres

- Étude de l'échelle atomique jusqu'à l'échelle du câble;
- Couplage du comportement microstructural et mécanique des monofilaments;
- Étude du comportement mécanique monotone et en fatigue des fibres;
- Conception d'essais mécaniques à l'échelle du monofilament ( $\phi$  égal ou supérieur à 5  $\mu\text{m}$ ) de -180 °C à 1600 °C : traction, fluage, relaxation, fatigue;
- Compréhension et identification des mécanismes de déformation et d'endommagement (MEB, MET, diffraction RX, Microanalyse EDS, Microscopie Raman, ...);
- Matériaux étudiés : PAN, PET, PA66, PE, aramide, verre, carbone, SiC,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;
- Simulation des sollicitations subies par les fibres dans la structure.

### Étude expérimentale et modélisation du comportement des stratifiés

- Identification et modélisation des phénomènes physiques à l'échelle des constituants (fibre, matrice, interface et ensimages);
- Développement d'essais expérimentaux représentatifs des sollicitations appliquées à la structure industrielle, tenant compte des conditions environnementales (immersion, humidité, température, choc thermique, fatigue);
- Observation des endommagements par microscopie optique et microscopie à balayage;
- Suivi in-situ en temps réel des endommagements par méthodes non destructives (émission acoustique, fibre optique);
- Détermination et prise en compte des contraintes résiduelles d'élaboration dans les calculs numériques;
- Écriture et identification des lois de comportement des composites à partir de bases expérimentales avec couplages thermiques, mécaniques et environnementaux.

### Caractérisation et modélisation des assemblages

- Développement d'outils de caractérisation et de dimensionnement sécurisant l'emploi du collage structural et des assemblages mixtes (soudo-collage, rivetage-collage, boulonnage-collage ...);
- Analyse et modélisation du comportement des multi-matériaux sous sollicitation quasi-statique, en fatigue thermomécanique et vieillissement climatique.

### Calcul de structures de pièces industrielles en composite

- Modélisation de structures industrielles complexes;
- Implémentation des modèles de comportement et de rupture dans les codes de calculs par éléments finis. Utilisation des techniques d'homogénéisation, procédés multi-échelles, sous-structuration;
- Conception et réalisation d'essais complexes de validation.

### Quelques applications industrielles

- Mécanismes de fatigue en température dans les fibres organiques de renforcement;
- Étude des processus de fluage et de fatigue dans les amarrages de plate-formes off-shore;
- Caractérisation et modélisation du vieillissement de matériaux composites verre / époxy;
- Étude expérimentale et numérique de la durée de vie des réservoirs sous pression en carbone/résine;
- Caractérisation et modélisation des phénomènes dissipatifs au sein de composites verre/polypropylène soumis à des sollicitations quasi-statiques et dynamiques;
- Conception et dimensionnement de pièces de robinetterie en matériaux composites;
- Modélisation et optimisation de sièges d'automobiles sur la base de critères ergonomiques.



# MINES DE PARIS — CENTRE DES MATÉRIAUX

## COMPORTEMENT À HAUTE TEMPÉRATURE

### PRÉSENTATION

L'étude du comportement de matériaux à haute température s'appuie sur une large panoplie de moyens d'essais mécaniques sur éléments de volume et sur structures, entre l'ambiante et 2000°C- voire au-delà-, qui associe essais monotones, de fluage, de relaxation des contraintes, cycliques et essais sous chargements thermiques et mécaniques combinés. Il s'agit de **simuler expérimentalement de façon aussi réaliste que possible les sollicitations attendues ou observées en service**. L'identification 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 les modèles d'ingénieur.

L'intégration dans les outils de calculs de structure se fait en coopération avec les numériciens du Centre (CoCaS) et de laboratoires d'autres institutions.

Le montage et l'animation du Réseau National Matériaux et Procédés Prometheref par M. Boussuge, fédère les travaux dans le domaine des propriétés thermomécaniques des réfractaires entre cinq laboratoires universitaires et trois partenaires industriels.

### Thèmes

#### Développement de Matériaux

Définition de nouvelles compositions, optimisation des microstructures grâce au contrôle des traitements thermomécaniques.

**Matériaux d'étude :** superalliages à base de nickel (nouvelles compositions, Inco 718), alliages Al Li, intermétalliques TiAlNb

Responsable : Loïc Nazé.

#### Comportement : plasticité et viscoplasticité

Modélisation des microstructures, des comportements couplés, de l'effet Portevin-Le Chatelier, des gradients de propriétés, des gradients thermiques, relaxation des contraintes.

**Matériaux d'étude :** céramiques, réfractaires, superalliages, alliages métalliques.

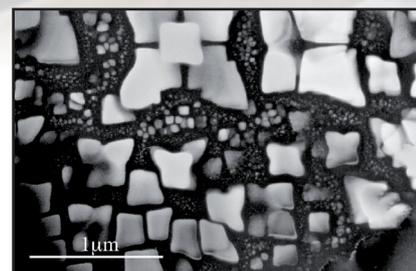
Responsables : Michel Boussuge, Luc Rémy.

#### Endommagement

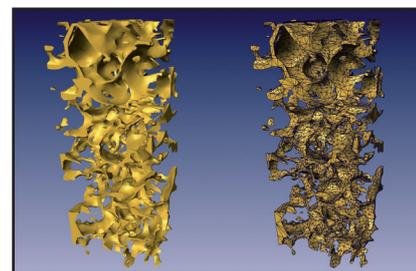
Chargements cycliques, fatigue-fluage, changement de phase, fissuration non stationnaire, approche locale, calculs viscoplastiques non-linéaires.

**Matériaux d'étude :** céramiques, réfractaires, superalliages monocristallins, multi-matériaux (composites à matrice métallique, superalliages revêtus), aciers inoxydables austénitiques et ferritiques, fontes, alliages à base d'argent (collaboration SIP).

Responsables : Michel Boussuge, Alain Koster, Vincent Maurel, Luc Remy.



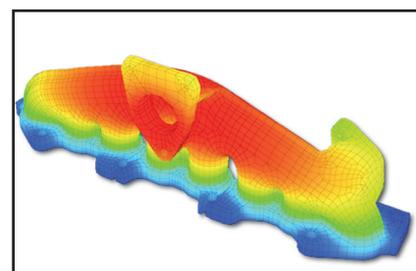
- DÉVELOPPEMENT DE MATÉRIAUX : DISTRIBUTION DE LA PRÉCIPITATION DURCISSANTE DANS UN SUPERALLIAGE BASE NI CONTRÔLÉE PAR LES PARAMÈTRES DU TRAITEMENT THERMIQUE (L. NAZÉ).



- COMPORTEMENT : MATÉRIAU BI-PHASÉ. PHASE VITREUSE IDENTIFIÉE PAR TOMOGRAPHIE X, RECONSTRUITE PAR TRAITEMENT D'IMAGE 3D. MAILLAGE DE LA PHASE VITREUSE (THÈSE K. MADI, PROMETHEREF).



- ENDOMMAGEMENT : ESSAI À HAUTE TEMPÉRATURE SUR ÉPROUVETTE CYLINDRIQUE DANS UN FOUR À LAMPES QUATRE LOBES (A. KOSTER).



- MODÉLISATION : SIMULATION DU CHARGEMENT THERMIQUE SUR CULASSE EN FONTE (THÈSE F. SZMYTKA PSA).

# COMPORTEMENT À HAUTE TEMPÉRATURE

## SAVOIR-FAIRE

### Examens microstructuraux

Microscopie électronique à balayage : microstructures, surfaces de rupture, textures en EBSD.

Microscopie électronique en transmission : microstructures, identification de phases par diffraction, microstructures de dislocation.

### Essais mécaniques complexes à haute température

- Cycles complexes simulant un chargement réel (ex : cycle moteur d'avion d'une aube de turbine) ;
- Fatigue mécano-thermique ;
- Fatigue thermique ;
- Fatigue-relaxation ;
- Essai de fluage ou de relaxation de contrainte ;
- Fissuration ;
- Corrélation d'images y compris à haute température.

L'ensemble des essais peut être réalisé à des températures allant de l'ambiante à 1200 °C pour la plupart des alliages et superalliages et jusqu'à 2400 °C pour les céramiques et réfractaires.

### Modélisation et intégration numérique des modèles

Dans le contexte économique actuel, les besoins de modélisation fine du comportement des pièces en service sont liés étroitement aux besoins en efficacité de calcul. L'équipe a su développer à la fois la mise en oeuvre de modélisations robustes sur des bases d'essais larges (monocristaux, aciers inoxydables, céramiques et réfractaires industriels) et des modèles fins prenant en compte des phénomènes allant de la chimie fine à l'endommagement macroscopique (ex : barrières thermiques et revêtement pour superalliage).

- Modélisation du comportement mécanique ;
- Modélisation de l'endommagement en conditions isothermes et anisothermes.

Ces thématiques sont en lien étroit avec les équipes COCAS pour les aspects simulation-calcul et SIP pour les aspects relevant de la chimie des matériaux. La méthodologie développée est dynamisée par la compréhension des phénomènes physiques fins qui sont mis en évidence lors des essais.

## MOYENS TECHNIQUES

- Machines d'essais mécaniques : traction, compression, fluage, relaxation, fatigue... ;
- Banc de fatigue thermique (effet Joule et chauffage radiant) ;
- Banc d'oxydation statique ou cyclique sans charge (fours à lampes) ;
- Enceinte pour la réalisation d'essai sous vide (fissuration, fatigue...) ;
- Suivi de l'endommagement / fissuration par méthode électrique ;
- Caméras numériques pour la mesure de déplacement par corrélation d'images ;
- Pilotage / acquisition des essais développé sous Labview® ;
- Microscope Électronique en Transmission 300 keV.



# MINES DE PARIS — CENTRE DES MATÉRIAUX

## MOYENS DE COMMUNICATION ET DE CALCUL

- **Responsable scientifique:** Valérie Mounoury.
- **Responsables techniques:** Grégory Sainte-Luce, Gérard Brabant.

### Informatique, Téléphonie, Réseaux

Le groupe CALCUL a la responsabilité des moyens informatiques et des moyens de communication :

- la gestion du parc informatique couvre la maintenance et l'évolution du matériel, l'installation et le déploiement des logiciels, ainsi que la gestion des licences, et la sauvegarde centralisée de toutes les données;
- le groupe gère les réseaux téléphonique et informatique du Centre, et assure les services associés (courrier électronique, accès internet...).

### Savoir-faire

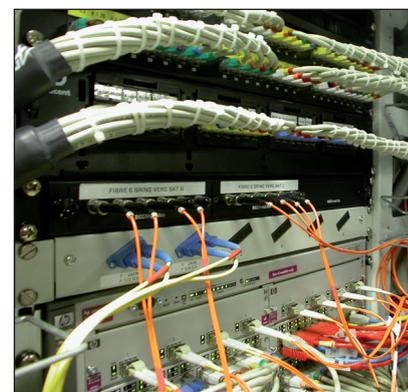
- Diagnostic et maintenance matérielle;
- Administration système multi-plateformes: Linux, Solaris, HP-UX, AIX, IRIX, Windows, MacOSX;
- Gestion du réseau en architecture sécurisée: translations d'adresses, réseaux locaux virtuels, filtrage;
- Formations des utilisateurs: initiation à l'environnement de travail, aux systèmes d'exploitation et aux langages de programmation (C, C++);
- Développements d'applications web: intranet, internet, outils de gestion de ressources informatiques.

### Moyens techniques

- 1 cluster de 78 nœuds sous Linux pour le calcul parallèle;
- 8 serveurs de fichiers pour environ 4 TéraOctets de données;
- 6 serveurs pour les services réseau;
- 75 postes de travail Unix/Linux dont 15 en libre service;
- 160 postes bureautiques Windows et MacIntosh;
- 70 PCs Windows affectés aux équipements;
- 1 librairie de sauvegarde pour 6 TéraOctets natifs;
- 11 imprimantes laser dont 3 couleur;
- 4 photocopieurs laser haut débit multi-fonctions (scan, copie, impression);
- 1 traceur couleur A0 pour les posters;
- 1 réseau Ethernet (100 Mb et 1Gb) et commutateurs de niveau 2 et 3;
- 1 autocommutateur téléphonique (140 postes) et système DECT.



• UNE SALLE INFORMATIQUE: POSTES DE TRAVAIL EN LIBRE-ACCÈS.



• MATÉRIEL ACTIF ET CÂBLAGE RÉSEAU (CUIVRE ET OPTIQUE).



• CLUSTER DE CALCUL: 78 NOEUDS BI-PROCESSEURS AMD OPTERON 248 (64 BITS, 2.2 GHZ), RAM DE 4, 8, OU 16 GO.



CAL

# SERVICES ADMINISTRATIFS & DOCUMENTAIRES

## Services administratifs

Responsable : Martine Dadci

L'administratrice assure, sous l'autorité du Directeur, la responsabilité administrative et financière du Centre. Elle dispose de l'ensemble des moyens administratifs et techniques d'intérêt général au profit de toutes les équipes de recherche et techniques et de tous les personnels du centre.

Pour ce faire, elle est assistée par des équipes spécialisées :

- accueil,
- secrétariats des équipes de recherche et techniques,
- gestion des ressources contractuelles,
- gestion des services généraux,
- gestion de la formation doctorale et du personnel non permanent,
- gestion des commandes et des factures.



## Service documentation

Responsable : Odile Adam

Fonds documentaire, essentiellement en langue anglaise : catalogue en ligne : <http://www.bib.ensmp.fr/>

Le fonds est constitué d'une soixantaine de titres de périodiques vivants et d'environ 4000 ouvrages spécialisés dans les domaines d'activité du centre.

### Collaborations

- Entre les différentes Ecoles des Mines en France (serveur SISTEM : <http://sistem.gemtech.fr/>);
- Echange avec l'Ecole Polytechnique (Palaiseau), le CEA (Saclay); la bibliothèque universitaire (Evry), le CECM (Vitry sur Seine)...

### Activités

- Recherche bibliographique et recherche de documents;
- Aide à la rédaction des références bibliographiques;
- Mise en ligne des thèses soutenues sur le serveur Pastel : <http://pastel.paristech.org/>



• CENTRE DOCUMENTAIRE.



- **RESPONSABLES SCIENTIFIQUES** : JACQUES BESSON, GEORGES CAILLETAUD, SAMUEL FOREST
- **CONSEILLERS SCIENTIFIQUES** : FRÉDÉRIC FEYEL, DOMINIQUE JEULIN
- **RESPONSABLE TECHNIQUE** : FRANÇOISE DI RIENZO

## CALCULS DE STRUCTURES

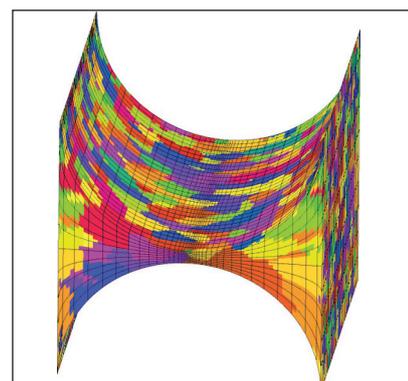
L'utilisation de modèles non linéaires représentant de plus en plus fidèlement le comportement des matériaux en situation extrême (charge, température, chargements complexes) est maintenant réaliste dans le cadre d'applications industrielles. À côté des modèles, il faut également disposer de bases de données d'une part, et d'implémentations numériques robustes, facilement utilisables dans des codes industriels. L'adaptation des codes aux calculateurs parallèles est un passage imposé pour la réalisation des calculs de grande taille représentatifs des pièces industrielles.



- LES AUBES DE TURBINES MONO-CRISTALLINES FONT L'OBJET DE PROCÉDURES DE CALCUL COMPLEXES PRENANT EN COMPTE LES MÉCANISMES DE DÉFORMATION CRISTALLINE (ÉTUDE SNECMA).

## CALCULS DE MICROSTRUCTURES

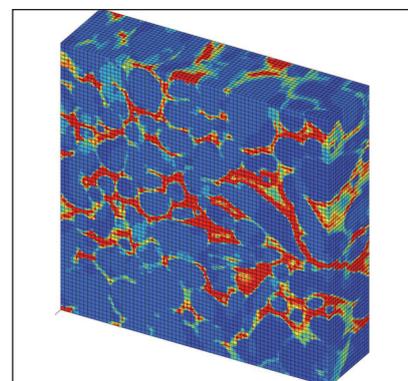
Les méthodes d'imagerie 3D et de simulation des milieux aléatoires permettent aujourd'hui de reconstituer des Volumes Élémentaires Représentatifs de matériaux hétérogènes. Il est alors possible de prévoir les propriétés mécaniques et physiques de ces matériaux ou de micro-systèmes, en fonction de celles des constituants. L'approche permet aussi d'explorer des microstructures et des propriétés inédites, voire optimales. Elle fournit aussi des évaluations des champs locaux de contraintes et de déformations, qui constituent les entrées pertinentes des futures classes de modèles d'endommagement.



- MICRO-SYSTÈME MÉCANIQUE MULTICRISTALLIN : LA PLUS PETITE DIMENSION DE LA STRUCTURE EST DE L'ORDRE DE GRANDEUR DE LA TAILLE DE GRAIN (ÉTUDE SAGEM).

## ENDOMMAGEMENT & PROBLÈMES COUPLÉS

L'approche locale de la rupture s'appuie généralement sur des analyses par éléments finis et repose sur l'emploi de lois de comportement intégrant une ou plusieurs variables internes représentant l'endommagement. On cherche avant tout à déterminer ces variables ainsi que leurs lois d'évolution soit à partir de modèles micromécaniques soit à partir de mesures directes. Pour comprendre un mécanisme de rupture, il est parfois nécessaire de traiter simultanément plusieurs problèmes physiques, dont les variables sont couplées (mécanique des couches d'oxyde, interaction mécanique-environnement, interaction mécanique-thermique).



- DÉFORMATION D'UNE LAMELLE DE CRÈME GLACÉE MODELISÉE À PARTIR D'IMAGES DE MICROSCOPIE CONFOCALE (LARGEUR 200 MICROMÈTRES). (COOPÉRATION UNILEVER-CENTRE DE MORPHOLOGIE MATHÉMATIQUE).

## SAVOIR-FAIRE

### Développement de lois de comportement

- Chargements complexes (cycliques, anisothermes, multiaxiaux);
- Plasticité cristalline, monocristal, polycristal;
- Changements de phase, précipitation, vieillissement;

### Identification et problèmes inverses

- Identification des paramètres des lois de comportement;
- Détermination de conditions aux limites;
- Constitution de base de données matériaux.

### Milieux continus généralisés

- Milieux non locaux, milieux de Cosserat;
- Second gradient, gradient de variables internes.

### Calculs de structures

- De l'éprouvette de laboratoire au globe terrestre;
- Structures à haute température, prévision de durée de vie;
- Composants des industries aéronautiques, automobiles et nucléaires;
- Contact-frottement, usure.

### Calculs de microstructures

- Modèles aléatoires de microstructures, volume élémentaire représentatif;
- Construction de maillages, agrégats polycristallins, matériaux cellulaires;
- Méthodes et modèles d'homogénéisation.

### Endommagement, fissuration, rupture

- Approche locale de la rupture, rupture ductile, rupture fragile;
- Fatigue, fatigue-fluage, fatigue-fretting;
- Propagation et arrêt de fissure, prise en compte de l'irradiation;
- Étude et contrôle des phénomènes de localisation, méthodes de régularisation.

### Couplages multiphysiques

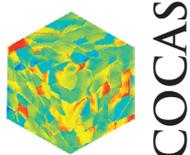
- Interactions mécanique-environnement, diffusion-mécanique;
- Chargements thermomécaniques, simulation de procédés.

### Développement logiciel

- Code Zset/ZéBuLoN, en partenariat avec ONERA et NW Numerics;
- Programmation orientée objet, calcul parallèle;
- Méthodes d'intégration robuste, librairie matériaux Z-mat.

Le CluB des utilisateurs du code : <http://www.mat.ensmp.fr/Produits/LeCLuB>

La GaZeTTe ZéBuLoN : <http://www.mat.ensmp.fr/Produits/LaGaZeTTe>





# MINES DE PARIS — CENTRE DES MATÉRIAUX

## MÉCANIQUE & MATÉRIAUX

### PRÉSENTATION

L'essentiel des études porte sur les alliages et les matériaux métalliques ainsi que les matériaux polymères utilisés dans l'industrie (turbomachines aéronautiques, transport ou production d'énergie électronucléaire, pétrolière, gazière et automobile). Les principaux thèmes et matériaux étudiés sont :

#### Les changements de phase

(A.-F. Gourgues-Lorenzon)

Les aspects cristallographiques et micromécaniques des transformations dans les aciers sont étudiés par l'EBSID. Les cycles thermiques de soudage en ZAT sont simulés à l'aide d'une machine de simulation thermomécanique GLEEBLE, ce qui permet d'étudier en détail les transformations métallurgiques et les propriétés mécaniques des microstructures rencontrées dans les joints soudés.

On s'intéresse aussi aux interactions entre (visco) plasticité et changements de phase dans les aciers TRIP et les alliages de zirconium.

#### L'endommagement sous chargement cyclique

(S. Cantournet, L. Laiarinandrasana, A. Pineau)

- L'amorçage des fissures en fatigue à haute température dans le superalliage 718;
- Influence des différentes charges sur la tenue en fatigue du caoutchouc naturel;
- la propagation des fissures en fatigue dans un alliage d'aluminium de fonderie;
- Implémentation de nouvelles lois de comportement et de critères d'amorçage d'une fissure sous chargements multiaxiaux (Code Z-set).

#### La rupture

(A. Pineau, S. Cantournet, L. Laiarinandrasana, B. Tanguy, A.-F. Gourgues-Lorenzon)

La méthodologie employée est celle de l'approche locale développée au Centre des Matériaux. Nous étudions :

- la rupture ductile (aciers, alliages d'aluminium) en prenant en compte le couplage entre comportement et endommagement par la mécanique des milieux poreux;
- la rupture dans le domaine de la transition (simulation de l'essai Charpy);
- la rupture à chaud (aciers austénitiques et martensitiques);
- l'effet de l'hétérogénéité des propriétés des matériaux sur la ténacité des joints soudés (aciers et alliages d'aluminium);
- le fluage du polyamide 11 vieilli (nylon).

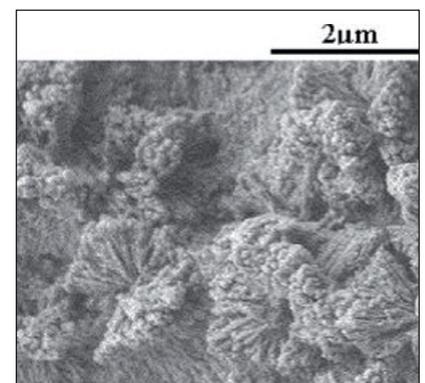
#### La rupture dynamique

(B. Tanguy)

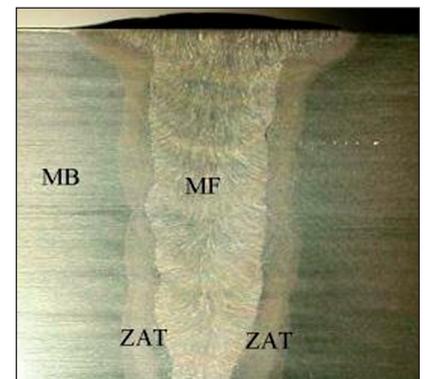
Elle est étudiée grâce à la mise au point d'essais originaux sur matériaux métalliques et polymères. Une machine servohydraulique grande vitesse (25 m/s), équipée d'une enceinte de température (-130°C, +300°C) et d'un système d'extensométrie laser permet de caractériser la réponse des différentes classes de matériaux jusqu'à des taux de déformation de l'ordre de 200 à 300 s<sup>-1</sup>.



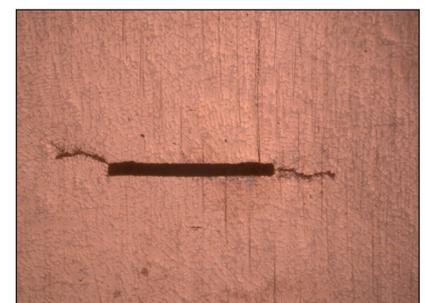
• MACHINE GLEEBLE DE SIMULATION THERMO-MÉCANIQUE.



• STRUCTURE SPHÉROLITIQUE DU POLYÉTHYLÈNE OBSERVÉE AU MEB.



• COUPE TRANSVERSE D'UN JOINT SOUDÉ PAR PROCÉDÉ BITORCHE AUTOMATIQUE.



• SUIVI OPTIQUE DE PROPAGATION DE FISSURE D'UN DÉFAUT DANS UN ALLIAGE D'ALUMINIUM.

## SAVOIR-FAIRE

### **Relation microstructure, comportement mécanique et durée de vie**

L'approche développée au sein de l'équipe Mécanique et Matériaux s'appuie sur la mise en évidence et l'observation de phénomènes physiques à partir desquels des modèles basés sur les mécanismes physiques sont développés. Ces modèles sont ensuite validés sur des éprouvettes de laboratoire, avant d'être utilisés pour prédire le comportement et la durée de vie de composants industriels.

L'expertise des mécanismes physiques a été développée autour de deux grandes familles de matériaux : les alliages métalliques et les polymères et caoutchoucs.

La compréhension des phénomènes physiques résulte d'un fort couplage entre, d'une part, des moyens de caractérisation mécanique classiques (solllicitations mécaniques monotones, fatigue, fluage), en température (- 196 °C à + 1200 °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), et d'autre part, l'utilisation des techniques d'observation structurale (microscopie optique et électronique à balayage, EBSD). Afin de reproduire au mieux les 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 solllicitations rapides. De même, un dispositif de simulation thermo-mécanique (Gleeble) permet de reproduire les différentes structures élaborées au cours des cycles du soudage.

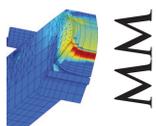
### **Intégration numérique des modèles développés**

A partir de l'expérimentation, les mécanismes physiques sont interprétés à travers le développement de modèles (comportement, rupture, changements de phase). Ces modèles sont ensuite intégrés au code de calcul Z-set, en collaboration avec l'équipe Comportement et Calcul des Structures. La simulation numérique est ensuite utilisée, d'une part pour tester la robustesse et le caractère prédictif des modèles (simulation d'essais sur éprouvettes de laboratoire) et d'autre part, sur pièces industrielles réelles pour prédire leur comportement et leur intégrité en service.

- Modélisation du comportement mécanique (élasticité, viscosité, plasticité).
- Modélisation de l'endommagement (ductile, fragile, fluage, cavitation, fatigue);
- Couplage éventuel entre différents modes de déformations et/ou différents modes d'endommagement.

## MOYENS TECHNIQUES

- Machines d'essais mécaniques quasi-statiques (traction, compression, fatigue, fluage, relaxation, traction-torsion) sous air et sous vide;
- Dispositif de simulation thermo-mécanique (Gleeble);
- Dilatométrie et essais mécaniques sous vide;
- Banc de traction – compression – torsion pour matériaux élastomères;
- Banc de dosage en continu de l'austénite résiduelle;
- Acquisition vidéo avec déplacement caméra couplée à la traverse;
- Corrélation d'images pour la détermination des champs de déformation;
- Suivi de fissure par microscopie optique avec acquisition vidéo;
- Fours pour traitements thermiques sous air et sous vide;
- Machine d'essais mécaniques rapide (traction, flexion, poinçonnement) avec vitesses de sollcitation de 0,9 à 25 m/s et en température (- 130 °C à + 300 °C).





# MINES DE PARIS — CENTRE DES MATÉRIAUX

## SURFACES-INTERFACES-PROCÉDÉS

### • Responsables Scientifiques

Yves Bienvenu ;  
Michel Jeandin ;  
Régine Molins ;  
Alain Thorel.

### • Chercheurs permanents

Marie Hélène Berger ;  
Christophe Colin ;  
Vincent Guipont.

### • Ingénieur de Recherche

Jean-Dominique Bartout.

### • Appui Technique

François Borit ;  
Gérard Brabant ;  
Nicole De Dave-Fabrègue ;  
René Locicero ;  
Karine Viellevigne.

## Présentation

Les thèmes de recherche développés par l'équipe Surfaces-Interfaces-Procédés concernent l'élaboration et la caractérisation de matériaux ou de composants à microstructure maîtrisée. Il s'agit de relier les procédés ( mise en forme à partir de poudre ou par solidification, assemblage, traitement de surface.....) aux propriétés d'emploi (physiques ou mécaniques) des matériaux ou des structures.

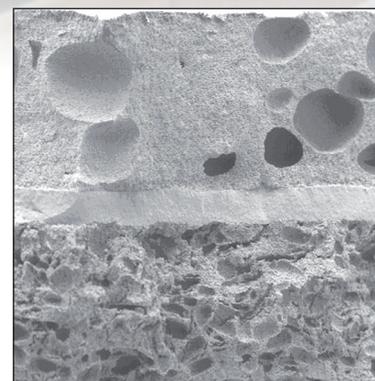
Dans ce contexte, les aspects liés aux propriétés des surfaces (chimiques, physiques et morphologiques) ainsi que les caractéristiques des interfaces (voire interphases) produites sont particulièrement étudiés. Les microstructures sont obtenues par changement d'état ou réaction de la matière, la matière étant considérée dans tous ses états en phases solide, liquide, gazeux ou plasma. Les travaux visent aussi à considérer les matériaux précurseurs ou produits à une échelle de plus en plus fine pour mettre en œuvre des matériaux nanostructurés.

## Les thèmes

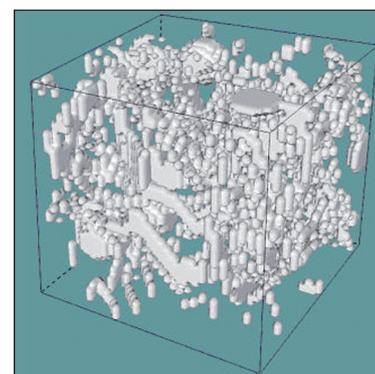
La recherche de microstructures « fonctionnelles » relève de la maîtrise des conditions thermodynamiques (transformations de phases, réactivité), des cinétiques de transport de matière et de chaleur qui sont étudiés pour les différents types de procédés appliqués (métallurgie des poudres, projection thermique, enduction ou immersion, assemblage métallurgique, usinage, prototypage rapide, réparation...). L'évolution actuelle marquée vers la mise en œuvre de matériaux nanostructurés nécessite l'emploi de techniques de caractérisations adaptées à cette échelle (MET, AFM, nanoindentation...).

Pour illustrer l'activité de l'équipe SIP, les matériaux étudiés peuvent être classés comme suit :

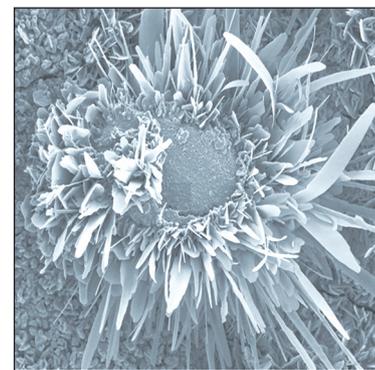
- Les matériaux à microstructure composite renforcée par des particules, ou par des fibres ;
- Les matériaux à porosité maîtrisée jusqu'aux mousses inorganiques ;
- Les matériaux fonctionnels à gradient de composition ;
- Les multi-matériaux, entre autres les matériaux revêtus ;
- Les nanomatériaux.



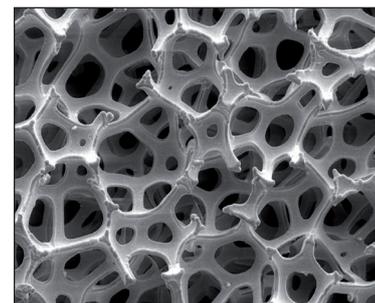
• CELLULE DE PILE À COMBUSTIBLE OBTENUE PAR CO-COULAGE ET CO-FRITAGE.



• SIMULATION DE LA POROSITÉ DANS UN DÉPÔT D'ALUMINE PROJETÉ PLASMA (20 $\mu$ m)<sup>3</sup>.



• OXYDATION FeCrAl 900 °C 300h, TRANSFORMATION DE PHASES DANS L'ALUMINE.

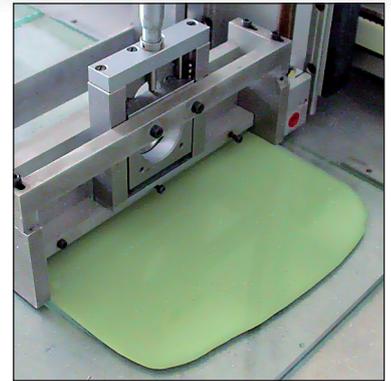


• MOUSSE MÉTALLIQUE POUR FILTRE À PARTICULE.

## SAVOIR-FAIRE

### MIC, Microstructure Interface Céramique

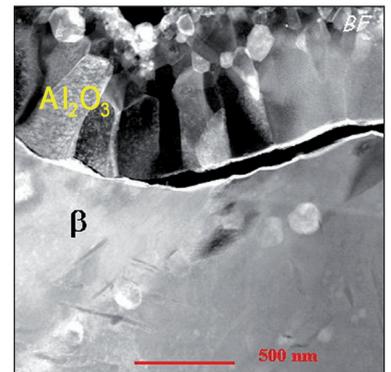
- Structure, cristallographie, propriétés des joints de grains et interfaces;
- Relations locales entre microstructure et propriétés physiques;
- Caractérisation et fonctionnalisation de nanomatériaux;
- Mesures électriques à haute température sous hydrogène, banc d'essai « SOFC »;
- Élaboration de matériaux céramique, coulage en bandes, frittage.



• BANC DE COULAGE.

### SIR, Surface Interface Réactivité

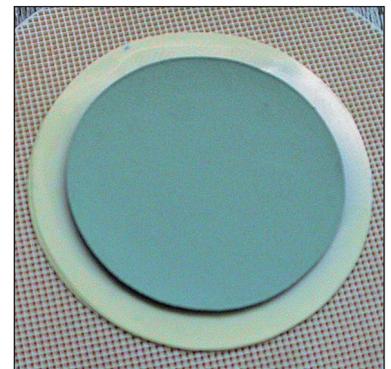
- Corrosion et protection des matériaux à haute température;
- Effets couplés oxydation/cinétique/mécanique;
- Physico-chimie des surfaces et interfaces;
- Fonctionnalisation de surface par réactivité gazeuse;
- Adhérence dans les systèmes multicouches.



• INTERFACE ALUMINE/SOUS-COUCHE DANS UN REVÊTEMENT BT (COLLABORATION SNECMA).

### MPE, Matériaux - Procédés – Élaboration

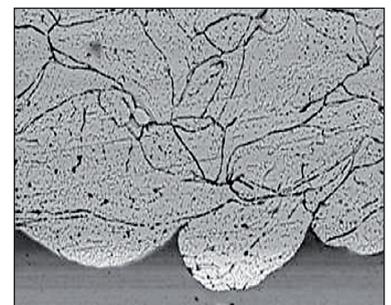
- Élaboration par solidification d'alliages et leur transformation thermo-mécanique;
- Élaboration de composites à fibre et à matrice métallique par infiltration réactive;
- Élaboration à partir de poudres de métaux, composites et cermets, matériaux à gradient, mousses métalliques;
- Assemblages métallurgiques par soudage, brasage, assemblage par diffusion, friction, réparations;
- Procédés à flux énergétique intense: dépôts de poudre et soudage sous faisceau laser, électroérosion, usinage à grande vitesse.



• CELLULE DE PILE À COMBUSTIBLE.

### C2P, Centre de Compétence en Projection Plasma

- CAPS : équipement multi-procédés robotisé, sous atmosphère et pression contrôlées, avec options:
  - Projection plasma (avec option refroidissement cryogénique);
  - Projection dynamique à froid (« Cold Spray »);
- Revêtements de/sur métaux, céramiques, polymères et composites;
- Propriétés d'interfaces et tribologiques de matériaux hétérogènes;
- Modifications de surfaces par faisceau d'énergie (plasma, laser, arc-transféré...);
- Essai LASAT de mesure d'adhérence par choc laser (coll. CNRS LALP/LCD).



• INTERFACE DE DÉPÔT DE Cu SUR Al PAR PROCÉDÉ DE PROJECTION DYNAMIQUE À FROID « COLD-SPRAY » (— 10 μm).



### PRÉSENTATION

Le groupe VALorisation se situe à l'intersection de la recherche et de la réalité industrielle. Ses activités gravitent essentiellement autour du code de calcul Z-set (ZéBuLoN, Z-mat), spécialisé dans les matériaux aux comportements non-linéaires. En tant qu'interface entre les laboratoires de recherche et l'industrie, VAL intervient :

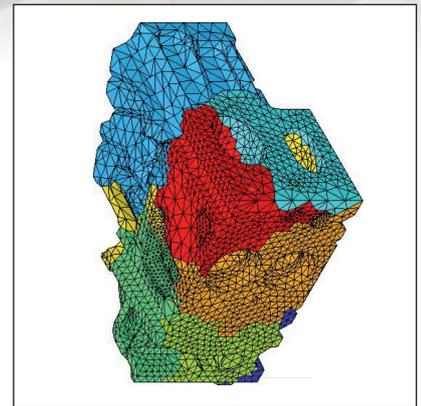
- dans le développement du code de calcul ZéBuLoN, partagé entre l'ONERA, Northwest Numerics (Seattle, USA), et le Centre des Matériaux ;
- en amont ou en aval de thèses, dans le cadre de projets de recherche en liaison avec l'équipe COCAS ;
- en tant que sous-traitant sur les thèmes de compétences du Centre des Matériaux, par le biais d'études ou d'expertises. Ces partenariats avec le milieu industriel peuvent se traduire soit par la mise en œuvre de calculs complexes, soit par le développement dans le code de calcul ZéBuLoN de nouvelles fonctionnalités répondant à des impératifs industriels spécifiques ;
- dans la distribution du code de calcul ZéBuLoN, impliquant la gestion des licences ainsi que l'assistance technique ;
- dans des formations dispensées sur les domaines d'application du code de calcul ZéBuLoN.

### Pour les industriels ...

Du fait de son principe de développement dit « orienté industrie », le code de calcul ZéBuLoN permet des extensions utilisateurs à volonté. De plus, il propose des lois de comportement sophistiquées sans équivalent dans les autres codes du marché, à l'exemple des modèles Centre des Matériaux - ONERA issus de la recherche et disponibles pour les industriels. Enfin, pour les calculs coûteux en temps CPU et/ou en mémoire, le code de calcul ZéBuLoN dispose d'un solveur parallèle conjugué à des outils de post-traitement parallèles.

### Calcul parallèle

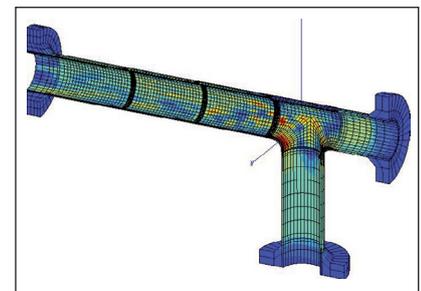
Le groupe VAL a accès en salle de calcul à un nouveau cluster de 78 bi-processeurs Opteron cadencés à 2,2 GHz, et disposant chacun de 4 à 16 Mo de mémoire vive. Le calcul parallèle est un des axes privilégiés du groupe qui se voit régulièrement confier la responsabilité de tels travaux.



- DÉCOMPOSITION EN 12 SOUS-DOMAINES D'UN MAILLAGE DE CULASSE POUR UN CALCUL PARALLÈLE À 100 000 DEGRÉS DE LIBERTÉ EN ÉLASTO-VISCOPLASTIQUE SOUS CHARGEMENT ANISOTHERME (PARTENARIAT AVEC RENAULT).



- CALCUL VISCOPLASTIQUE SUR 100 CYCLES (80 000 DEGRÉS DE LIBERTÉ) D'UNE AUBE DE TURBINE SOUS CHARGEMENT THERMOMÉCANIQUE COMPLEXE. POST-TRAITEMENT DE DURÉE DE VIE : NOMBRE DE CYCLES À RUPTURE (PARTENARIAT AVEC SNECMA).



- ISOVALEURS DE LA CONTRAINTE ÉQUIVALENTE DE VON MISES ; RÉSULTAT D'UN CALCUL PARALLÈLE ÉLASTO-VISCOPLASTIQUE SUR 600 000 DEGRÉS DE LIBERTÉ. PROJET FATHER (PARTENARIAT AVEC EDF).

## Présentation du code de calcul ZéBuLoN

Développé conjointement par l'ONERA, Northwest Numerics (Seattle, USA), et le Centre des Matériaux, ZéBuLoN est un code de calcul éléments finis adapté aux problèmes de mécanique non linéaire. Programmé en C++, ZéBuLoN présente une structure modulaire orientée objet, qui comprend principalement :

- Z-master : interface graphique de pré et post-traitement. Z-master est aujourd'hui distribué sous deux versions :  
Z-master2D, qui comprend un maillageur bidimensionnel ouvrant sur des constructions tridimensionnelles par extrusion, et Z-master3D, qui intègre les maillages BLSurf (tridimensionnel surfacique) et GHS3D (tridimensionnel volumique) développés à l'INRIA ;
- Z-solve : solveur numérique ;
- Z-psolve : solveur numérique parallèle ;
- Z-post : post-traitement séquentiel ou parallèle, qui propose un dépouillement des résultats de façon globale ou locale ;
- Z-sim : simulateur visant, avant d'entreprendre un calcul de structure complet, à tester les lois de comportement sur un élément de volume ;
- Z-optim : optimiseur adapté à la résolution des problèmes inverses, à la caractérisation des matériaux, et à l'optimisation de structures ;
- Z-mat : une librairie matériau particulièrement fournie, qui permet de concevoir des lois de comportement complexes par le biais d'une interface modulable orientée objet, reposant sur le langage utilisateur ZebFront.

Des années de recherche ont abouti à l'élaboration d'une bibliothèque matériau comptant un nombre considérable de lois de comportement sans équivalent sur le marché, conjuguée à des méthodes d'intégration robustes ainsi qu'à des procédures performantes d'identification de coefficients.

Dans le souci de mettre à disposition ces produits de la recherche, des travaux ont récemment été entrepris afin de coupler Z-mat avec les grands codes de calcul du marché. C'est ainsi qu'ont été développés les modules Z-aba (pour Abaqus), Z-marc, Z-ansys, Z-samcef, Z-aster.

Pour répondre à toutes les demandes, ZéBuLoN est distribué sous UNIX/Linux, Windows, Sun, Hewlett Packard, Silicon Graphics et IBM.

## Partenaires

Vecteur des produits de la recherche au profit des industriels, le groupe VAL compte de nombreux partenaires industriels (leaders entre autres des secteurs de l'énergie, de l'aéronautique et de l'automobile) et académiques, parmi lesquels :

Adera / Atofina / Bertrandt / CEA / CETIM / Dera / EDF / ENSAM / ENSICA / ENSM Albi / Essilor / Faurecia / Ferrari Formule 1 / GDF / GE Medical / GIE Aérospatiale / IFP / IRSID / Labinal / LSG2M Nancy / Montupet / ONERA / Péchiney / Principia / PSA / Renault / Saft-Alcatel / Saint Gobain / Snecma / Socaltec / Sollac / Solvay / ST Microelectronics / Teuchos / Thalès / Ugine / Université de Leoben / Université de Stuttgart / Université Technologique de Troyes / Vesuvius / Wintherthur

## Contact

De 9 h à 17 h : 01 60 76 30 53

zval@mat.ensmp.fr





## LE CLUSTER DE CALCUL

Le terme de cluster (ou grappe, en français) désigne un ensemble d'ordinateurs indépendants, appelés nœuds, tous interconnectés par un réseau dédié. On dispose ainsi d'une machine capable de traiter des problèmes de très grande taille, en utilisant la puissance cumulée de ses nœuds.

Le Centre des Matériaux qui a fait le choix, depuis 6 ans, de cette technologie évolutive et de bon rapport performance/prix, s'est doté en août 2005 d'un nouveau cluster de calcul à base de processeurs 64 bits Opteron.

### Description technique

#### Architecture

- 78 nœuds de calcul;
- 1 réseau Ethernet Gigabit pour le calcul;
- 1 réseau Ethernet 100Mbps pour l'administration;
- 1 poste maître pour l'accès et la gestion du cluster;
- 2 serveurs de fichiers d'une capacité de 2 Téraoctets chacun.

#### Configuration des nœuds

- Bi-Processeurs 64 bits AMD Opteron 248 cadencés à 2.2 Ghz, de 4 à 16 Go mémoire selon les nœuds;
- 120 Go disque dur SATA;
- 2 cartes réseau Ethernet 10/100/1000;
- 1 carte réseau Fast-Ethernet + carte de management.

#### Logiciels

- Logiciel de clustering Rocks 4.0.0 (distribution Linux orientée clustering)
- Logiciels scientifiques :
  - Zset/ZeBuLoN : calcul parallèle par éléments finis (Centre des Matériaux, Onera, NorthWest Numerics);
  - Metis, SplitMesh (Onera) : outils pour le partitionnement de maillages;
  - Blsurf, Ghs3d, Yams : logiciels de maillage et remaillage (INRIA);
  - Matlab : calcul formel.

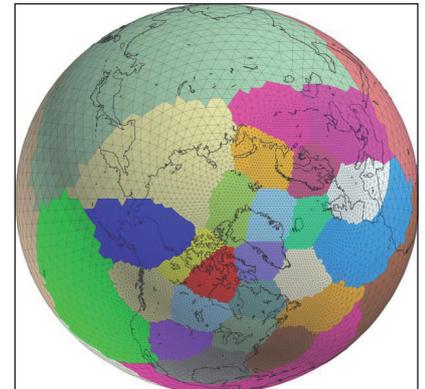
#### Performances

Dans sa configuration d'achat, la puissance théorique du cluster est 10 fois inférieure à la première machine française et 500 fois inférieure à la première machine mondiale, mais le place néanmoins parmi les 2000 plus gros calculateurs du monde.

Cet équipement a été acquis grâce au soutien financier du Conseil Général de l'Essonne et du Conseil Régional d'Île-de-France, dans le cadre d'une opération de la Fédération Île-de-France Sud « Mécanique et Matériaux ».



- CLUSTER DE CALCUL: 78 NŒUDS BI-PROCESSEURS AMD OPTERON 248.



- MAILLAGE DU GLOBE TERRESTRE POUR L'ÉTUDE DU PHÉNOMÈNE DE REBOND POST-GLACIAIRE (2 MILLIONS DE NŒUDS, 40 SOUS-DOMAINES).

# LE CLUSTER DE CALCUL

En mécanique des matériaux et des structures, la demande industrielle comme celle des chercheurs conduit à des simulations de plus en plus volumineuses, parce qu'il est nécessaire d'affiner les géométries (géométrie des composants, forme des microstructures), et parce que les lois de comportement des matériaux sont de plus en plus complexes. Les calculs ne sont alors plus réalisables sur des machines classiques en un temps raisonnable, mais peuvent être effectués en quelques jours sur la nouvelle machine parallèle, pour des cas de calculs à plusieurs millions de degrés de liberté. La méthode de calcul parallèle retenue s'appuie sur une décomposition de domaines, et une résolution itérative du problème aux interfaces (méthode FETI). Elle s'accommode parfaitement de la configuration de la machine, qui est à mémoire distribuée. Le travail s'effectue en coopération avec des équipes de l'ONERA et de l'ENS Cachan.

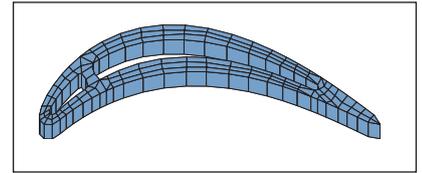
## Calcul de structures

Pour les calculs d'aube de turbine de moteur aéronautique (planches ci-jointes), on est passé d'une simple tranche simulée avec un modèle de matériau isotrope à des simulations 3D prenant en compte le caractère monocristallin du matériau, et la géométrie locale réelle. Mais les champs locaux autour des trous ne pas encore représentés de façon satisfaisante. La réalisation de ces calculs sans hypothèse simplificatrice nécessite des maillages de plusieurs millions de nœuds, ce que le cluster actuel nous permet d'envisager.

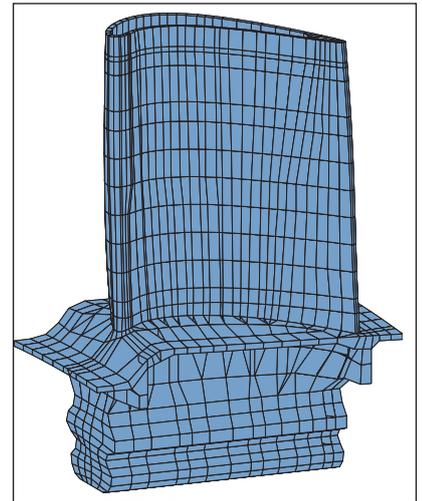
Hormis l'aéronautique, les domaines concernés sont ceux de l'énergie (centrales nucléaires ou thermiques), des transports (automobile, ferroviaire), mais aussi la micro-électronique (contraintes résiduelles dans les circuits) et les technologies émergentes (hydrogène...).

## Calcul de microstructures

Présents dans la littérature depuis les années 90, les calculs d'agrégats ont d'abord eu pour rôle de déterminer le comportement moyen d'un matériau homogène. En accord avec les progrès des moyens de mesure en micromécanique, on a souhaité ensuite obtenir des informations plus locales, en moyenne sur chaque phase. La tendance actuelle cherche à caractériser des champs locaux à l'échelle de la microstructure, afin de fournir des variables critiques pertinentes pour les modèles d'endommagement et d'amorçage de fissure. La planche ci-contre représente par exemple un résultat de calcul sur un polycristal de cuivre, comportant près de deux millions de nœuds.



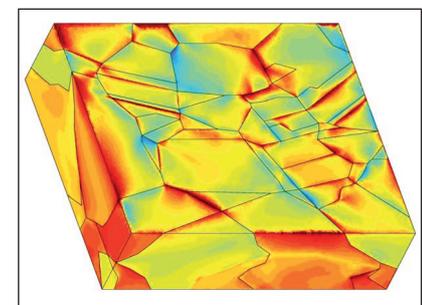
• 1992 :  
PREMIÈRE SIMULATION NON LINÉAIRE,  
3 500 ÉQUATIONS.



• 1997 :  
AUBE ENTIÈRE, 44 000 ÉQUATIONS.



• 2000 :  
CALCUL PARALLÈLE, 560 000 ÉQUATIONS.



• 2005 :  
AGRÉGAT DE CUIVRE POLYCRISTALLIN,  
ACTIVITÉ DES SYSTÈMES DE GLISSEMENT,  
5 MILLIONS D'ÉQUATIONS.



**RESPONSABLE :** ALAIN THOREL.

MARIE-HÉLÈNE BERGER (ÉQUIPE SIP)  
RÉGINE MOLINS (ÉQUIPE SIP);

**APPUI TECHNIQUE :** RENÉ LOCICERO (ÉQUIPE SIP).

### Contexte général

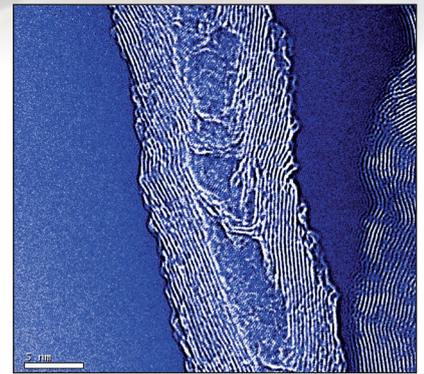
L'École des Mines de Paris/ARMINES, le Génopole et l'INSERM ont constitué à Evry un pôle commun de microscopie et d'imagerie de site. Dans ce cadre, les partenaires, fortement aidés par la Région, ont fait l'acquisition d'un nouveau microscope électronique en transmission : un Tecnaï F 20 ST de marque FEI, opérant à 200 KV.

Ce microscope a été installé au Centre des Matériaux de l'École des Mines, qui en assure la gestion et la maintenance courante, et qui a aussi en charge la formation des utilisateurs. L'activité « Biologie » et l'activité « Physique des matériaux » se partagent le temps d'utilisation du microscope à raison de 50% chacune.

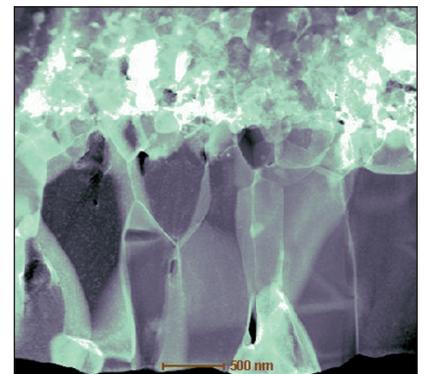
### Le Microscope

Le concept des microscopes Tecnaï est axé sur la complète intégration numérique de tous les signaux collectés par les détecteurs de la colonne. Les images ou analyses d'un même échantillon peuvent ainsi être acquises simultanément par les détecteurs STEM (Transmission en Balayage) en fond noir et fond clair, EDX (analyse X), ELS/GIF (spectrométrie de pertes d'énergie/filtrage en énergie), HAADF (contraste de numéro atomique), caméra vidéo ou CCD, et être visualisées sur le même écran.

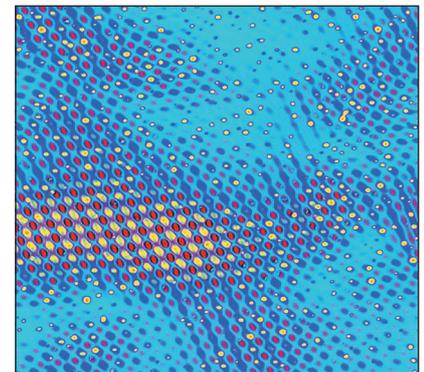
La résolution spatiale du Tecnaï F 20 ST en mode « Haute Résolution » classique (HRTEM) est de 0,24nm, tandis qu'elle est de 0,16nm en mode « Haute Résolution en Balayage » (HRSTEM/HAADF). Ce microscope permet donc de visualiser directement, dans beaucoup de cas, les colonnes atomiques des matériaux.



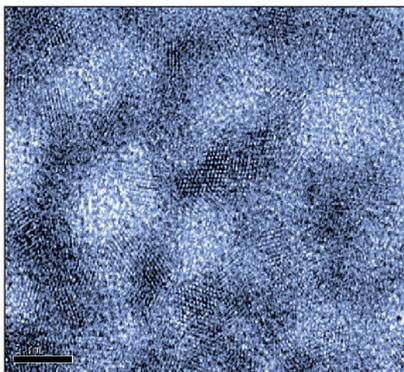
Nanotube de carbone  
(col. J.P.Boudou, Uni.Pierre et Marie Curie, S.Agavonof, Uni. Tours).



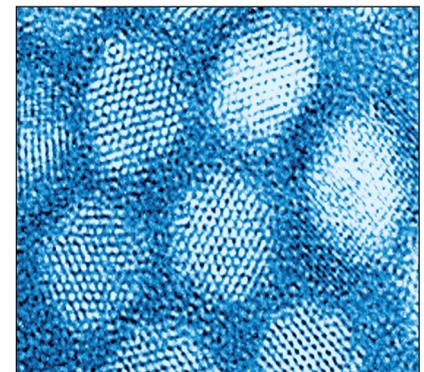
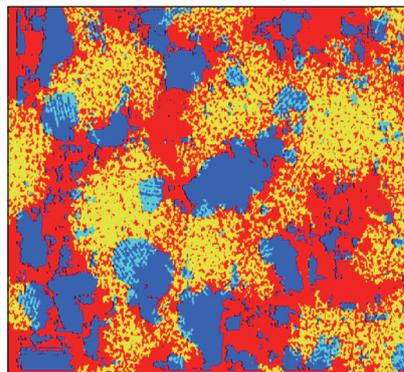
Couche duplex NiO sur Ni  
(col. A.M.Huntz, Lemhe, Uni. Paris-Sud)



Mise en ordre local des lacunes d'oxygène dans la mullite  
(col. A.Sayir, NASA-CWRU, et C.Kisielowski, LBL, Uni. Berkeley).



Catalyseur cérique-silice nanoporeux auto-assemblé (col. J.Y.Chane-Ching, Rhodia).



Auto-assemblage de quantum dots cdse émettant à 620nm  
(col. B.Dubertret, ESPCI).

# MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE EN TRANSMISSION

Cet appareil, équipé d'un canon à émission de champ (FEG), est particulièrement bien adapté à l'analyse chimique élémentaire EDX, y compris des éléments légers grâce à une sonde électronique très fine et très brillante, qui permet de sonder les matériaux à l'échelle du nanomètre.

Grâce à une excellente résolution en énergie (0,65eV), la Spectrométrie de Pertes d'Énergie des Electrons (ELS), outre le dosage chimique élémentaire, permet d'accéder à la liaison chimique et, dans certains cas, à la mesure de propriétés locales (fonction diélectrique, indices optiques). Couplée à un système de filtrage en énergie (GIF), comme c'est le cas sur notre microscope, elle permet d'acquérir des cartographies chimiques en temps réel.

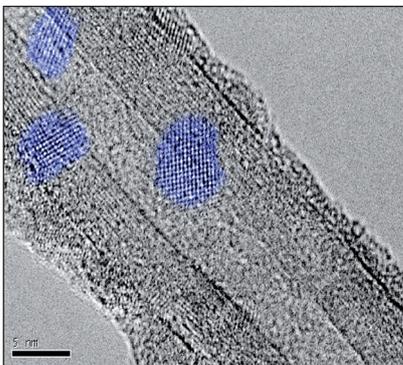
## Savoir-faire

Le Tecnai F 20 ST est un appareil polyvalent, qui répond parfaitement aux demandes courantes des biologistes et des physiciens des matériaux, mais dont les caractéristiques principales sont plutôt tournées vers l'analyse chimique élémentaire à l'échelle nanométrique. Pour ce qui concerne les applications en Science des Matériaux, il a été choisi pour répondre aux demandes actuelles du Centre des Matériaux tout en permettant d'aborder les matériaux de demain. En liaison avec les chercheurs du laboratoire et nos partenaires extérieurs, ce microscope joue et jouera un rôle déterminant dans les axes de recherche suivants :

- Développement de nouveaux alliages;
- Structure et propriétés des interfaces;
- Corrosion et Protection des matériaux;
- Assemblages et multimatériaux;
- Nanomatériaux.

## Domaines d'activité

- Énergie;
- Automobile;
- Aéronautique;
- Espace;
- Chimie;
- Microélectronique;
- Environnement;
- Sidérurgie...



Particules de TiO<sub>2</sub> sur un nanotube de carbone ; application photocatalyse (col. S Bonnamy CNRS Orleans).

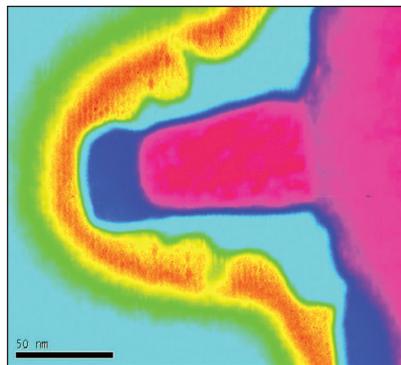
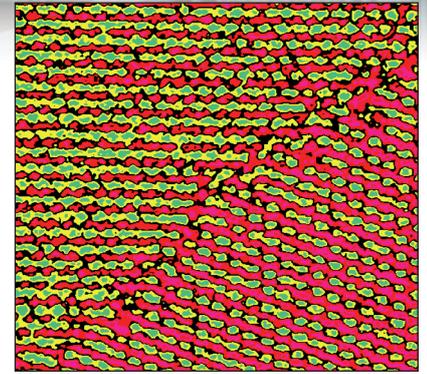
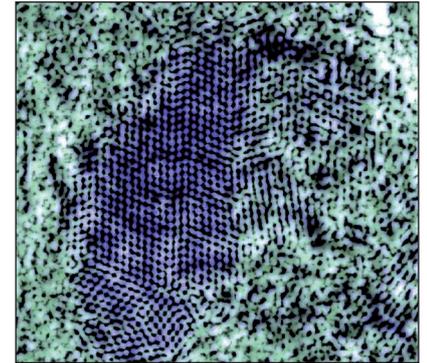


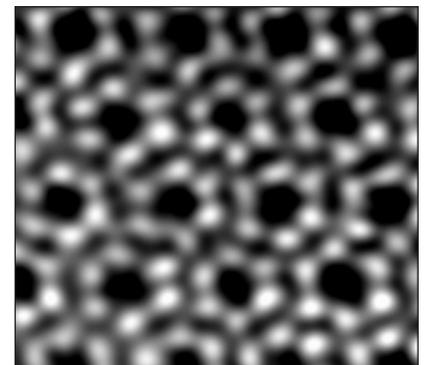
Image du silicium, filtrée en énergie sur une grille de transistor (col. ST Microelectronics).



Joint de grains dans un bi-cristal Al-4%Cu (col. U.Dahmen, Lawrence Berkeley Lab, Uni. Berkeley).



Nano-maillage dans un nanodiamant : marquage de protéines, et support de catalyse (col. INSERM, Uni. PM Curie).



Identification des atomes d'oxygène dans le SiAlON par HRSTEM (col. C.Kisielowski, LBL, Uni. Berkeley).

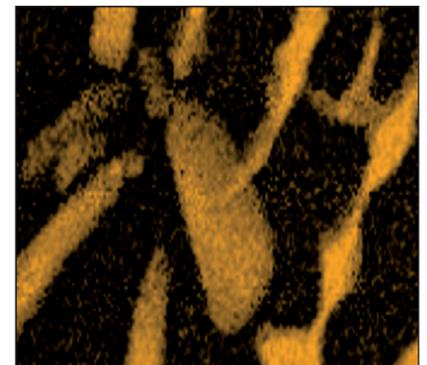
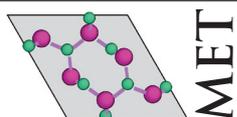


Image chimique de Cr dans un système barrière thermique (col. SNECMA, groupe SAFRAN).





### PRÉSENTATION DU MOYEN D'ESSAI

La plate forme d'essais est une machine servo-hydraulique avec les caractéristiques nominales suivantes :

- Capacité de 65kN en sollicitations rapides;
- Vitesse maximale de vérin de 25 m/s;
- Chambre de température entre  $-135^{\circ}\text{C}$  et  $+250^{\circ}\text{C}$ ;
- Montages de traction, flexion 3 points (type Charpy), poinçonnement;
- Extensométrie sans contact Laser à effet Doppler jusqu'à 25Mhz;
- Acquisition des données (Charge, vitesse, allongement, accéléromètre, etc) par 8 voies synchronisées à 5Mhz;
- Système Profiler® pour obtenir une vitesse de vérin quasi constante au cours de l'essai;
- Cellules de charge spécifiques développées au Centre des Matériaux.

### Couplage expérimentation/simulation numérique

L'exploitation d'un tel moyen d'essai pour obtenir des caractéristiques vraies du matériau est souvent couplée à la simulation numérique afin de dissocier la réponse globale obtenue en une réponse caractéristique du matériau et une partie due à des effets inertiels. Par exemple pour les matériaux fragiles la simulation numérique permet de quantifier l'instant ou l'uniformité des contraintes dans les éprouvettes est vérifiée.

Une approche inverse couplée aux outils de d'optimisation développés sous le code Eléments Finis ZéBuLon permet alors une identification robuste des paramètres des lois matériaux développées.



- Machine servo-hydraulique.

# TRACTION À GRANDE VITESSE

## SAVOIR-FAIRE

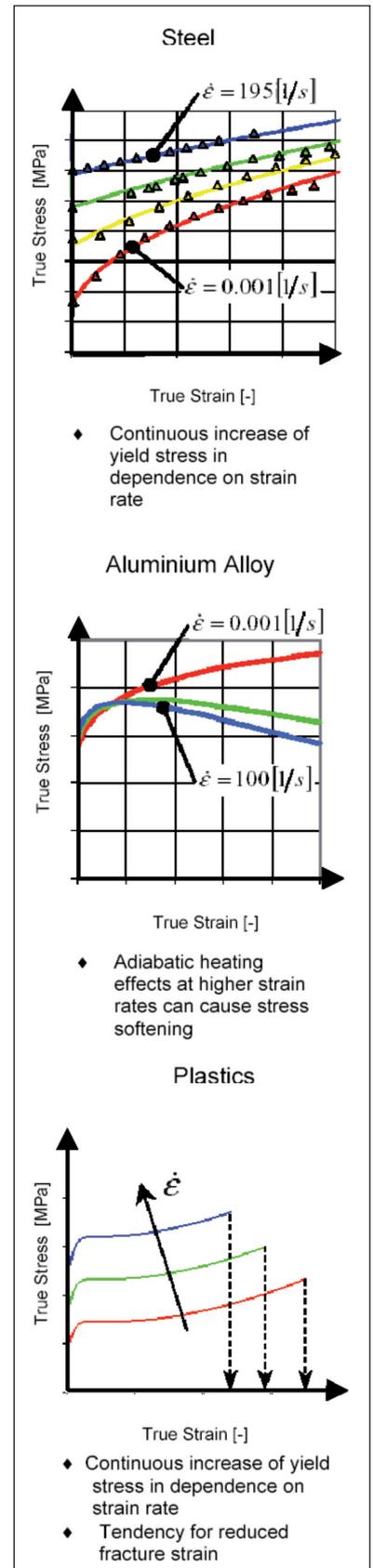
- Caractérisation expérimentale des matériaux entre 0.01 et 300 s<sup>-1</sup> ;
- Développement d'instrumentations spécifiques aux essais sous sollicitations rapides ;
- Écriture de lois de comportement appropriées aux phénomènes mis en jeu ;
- Détermination des paramètres des lois de comportement à partir d'un couplage expérimentation/simulation numérique par minimisation de fonction coût (logiciel d'optimisation) ;
- Intégration des lois de comportement sous le code de calcul ZéBuLon ;
- Calcul de structure sous sollicitations rapides.

Le développement d'une plate-forme d'essais mécaniques sous sollicitations rapides au Centre des Matériaux s'inscrit dans le contexte d'une croissance de la demande d'essais à grandes vitesses par nos partenaires industriels, tels que l'industrie automobile et ses sous traitants (Renault, PSA, Plastic Omnium, etc), aéronautique (EADS, Airbus), de l'énergie et du transport (EDF, Europipe, Total, Institut Français du Pétrole, Atofina, Coflexip, etc). L'ambition affichée est d'une part, la réduction du temps nécessaire pour la phase de développement d'un nouveau produit, et d'autre part une meilleure prédiction de la fiabilité et de la durabilité, ceci à partir du développement d'outils de simulation prédictifs, permettant pour les différents composants le choix des matériaux en fonction de la sollicitation mécanique appliquée.

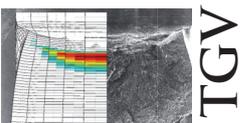
Le développement de ces outils de simulation passe par une étape indispensable qui est la caractérisation expérimentale et la modélisation du comportement des différents matériaux. Beaucoup d'applications requièrent la connaissance du comportement des matériaux pour une gamme de vitesse de déformation allant de 0.01 jusqu'à quelques centaines de s<sup>-1</sup>. On peut citer en exemple la sollicitation de type « crash-test » dans l'industrie automobile. La non-linéarité de la relation comportement vitesse de déformation (illustrée sur la figure ci-contre) ne permet pas d'extrapoler sans risque la réponse quasi-statique des matériaux et nécessite une détermination expérimentale. C'est pour répondre à ce besoin industriel fort qu'un moyen de caractérisation expérimentale spécifique a été développé au centre des Matériaux, couplé à une thématique de recherche sur les lois de comportement élastoviscoplastiques des matériaux.

Famille de matériaux étudiés : De part son savoir faire et la diversité de ses thèmes de recherche, le Centre des Matériaux possède une grande expérience dans la modélisation du comportement des matériaux métalliques, des composites, des plastiques et des mousses polymères ou métalliques. À ce jour, la modélisation du comportement des matériaux métalliques et des composites sous sollicitations rapides représente une part importante des travaux réalisés sur cet équipement.

Contacts : Benoît Tanguy (Benoit.Tanguy@ensmp.fr),  
Jacques Renard (Jacques.Renard@ensmp.fr)



- INFLUENCE DE LA VITESSE DE SOLLICITATION SUR LE COMPORTEMENT MÉCANIQUES DE DIFFÉRENTS MATÉRIEAUX.





École des mines de Paris, Centre des Matériaux, 10 rue Desbruères, BP 87, 91003, Évry Cedex  
Tél : 33 1 60 76 30 00 Fax : 33 1 60 76 31 50 <http://www.mat.ensmp.fr>



Avec le soutien du Conseil général de l'Essonne

