

# RAPPORT D'ACTIVITÉ



Edition 2008-2009

L'école au cœur



de l'innovation



**GEM**  
FRANCE

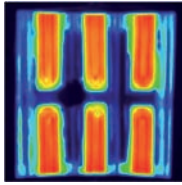
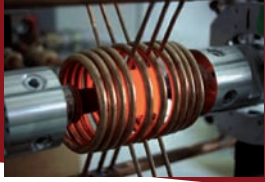
Groupe des Ecoles des Mines

Albi • Alès • Douai • Nancy • Nantes • Paris • Saint-Etienne



**ECOLE DES MINES D'ALBI**  
C A R M A U X

# CROMeP - Centre de Recherche, Outillages, Matériaux et Procédés



## Acteurs du CROMeP

### ENSEIGNANTS-CHERCHEURS

Gérard Bernhart  
Professeur, Directeur,  
Directeur-adjoint de l'Institut Clément Ader

Florentin Berthet  
Chargé de Recherche

Christine Boher  
Maître-Assistante  
responsable secteur apprentissage SIMMA

Mohammed Cheikh  
Maître de Conférences IUT de Figeac,  
Chercheur-Associé

Thierry Cutard  
Maître-Assistant, HDR, Directeur-adjoint par interim,  
responsable département enseignement GMM

Denis Delagnes  
Maître-Assistant

Pascal Lamesle  
Maître-Assistant

Yannick Le Maoult  
Maître-Assistant, HDR, responsable équipe de  
recherche MODT

Philippe Lours  
Maître-Assistant, HDR, responsable équipe de  
recherche SuMO, responsable option enseignement MAS

Omer Mercier  
Professeur, Directeur-adjoint

Jean-José Orteu  
Professeur, Directeur-adjoint,  
responsable groupe de recherche MCS de l'Institut  
Clément Ader

Luc Penazzi  
Maître-Assistant

Farhad Rézai-Aria  
Professeur, responsable groupe de recherche SUMO de  
l'Institut Clément Ader

Laurent Robert  
Maître-Assistant

François Ronde-Oustau  
Professeur, responsable option enseignement IM

Fabrice Schmidt  
Professeur, responsable équipe de recherche MaSC

Thierry Sentenac  
Maître-Assistant, responsable département enseignement  
GEA

Vincent Velay  
Maître-Assistant

Vanessa Vidal  
Maître-Assistante associée

### INGENIEURS DE RECHERCHE

Jean-Paul Arcens  
Florian Bugarin  
Rémi Gilblas  
Eric Jourdain  
Michaël Ribeiro

### TECHNICIENS

Didier Adé  
Karim Choquet  
Sabine Le Roux  
Vincent Lucin  
Jean-Michel Mouys  
Thomas Papaix  
Fabrice Rossi  
Serge Tovar

### ADMINISTRATIFS

Catherine Maffre  
Assistante de gestion

Esther Ramirez  
Assistante administrative

### POST-DOCTORANTS

Benoît Cosson  
Olivier De Almeida  
Gilles Dusserre

**19 Enseignants-chercheurs  
5 Ingénieurs de recherche  
8 Techniciens  
2 Personnels administratifs  
3 Post-doctorants  
31 Doctorants**

**DOCTORANTS**

Zeeshan Ahmer  
Laura Balea  
Cédric Bellot  
Romuald Bertolaso  
Maxime Bordival  
Nicolas Decultot  
Anthony Delmas  
Mustafa Demirel  
Nicolas Donval  
Benoît Ducarouge  
Renaud Gantois  
Maëlle Guichon  
Jacques Harvent  
Samia Hmida  
Olivier Joos  
Tchadja Kagnaya  
Guy-Léon Kaza  
Yohann Ledru  
Aurélien Mazzoni  
Claire Michel  
Dang-Huy Nguyen  
Alvine Njionhou  
Christophe Paris  
Nicolas Pirc  
Souleymane Ramde  
Marie-Cécile Robin  
Mehdi Salem  
Masood Shah  
Inès Souki  
Fabio Taina  
Sébastien Triollet

**SOUTENANCES DE THESE**

Sébastien Mauries  
Soutenu le 18 décembre 2008

Julien Sniezewski  
Soutenu le 16 décembre 2008



*L'équipe du CROMeP*

RAPPORT D'ACTIVITÉS 2008 DU CROMeP



Créé en 1992, le centre de Recherche Outillages, Matériaux et Procédés (CROMeP) mène des activités de recherche orientées vers :

- l'optimisation des outillages et moules de formage en se basant sur une approche multidisciplinaire matériaux/mécanique et modélisation/simulation,
- l'étude des nouveaux matériaux et procédés, à la fois métalliques et composites, pour l'industrie automobile et aéronautique,
- le développement de nouvelles techniques métrologiques basées sur des capteurs optiques non ou faiblement intrusifs pour la photo-thermo-mécanique expérimentale et la surveillance des procédés.

Il est fortement intégré dans la recherche :

- au niveau régional où il est partenaire de la fédération entre laboratoires « Institut Clément Ader », membre de la fédération de recherche CNRS FED4301 « Institut de Génie Mécanique », membre du pôle de compétitivité Aérospatiale Valley ; le CROMeP est partenaire de 4 projets de la région Midi Pyrénées et de 3 projets EPICEA,
- au niveau national de par son appartenance à l'Institut Carnot MINES (Méthodes Innovantes pour l'Entreprise et la Société) et au GDR CNRS 2519 « Mesures de champs et identification en mécanique des solides » ; Il est également membre des pôles de compétitivité EMC2, VIAMECA, AHG Céramiques. Cette implication se traduit par la participation à 7 projets ANR et 3 projets FUI.
- au niveau international par des thèses en co-tutelle et comme partenaire de plusieurs projets européens sur les outillages et les procédés.

La plupart des travaux de recherche sont conduits sous la forme de thèses, dans le cadre de projets industriels et concernent principalement les procédés :

- de mise en oeuvre de matériaux métalliques : forgeage, fonderie, formage superplastique, emboutissage à froid et à chaud, laminage à chaud, formage incrémental, traitement thermique,
- de mise en forme de matériaux polymères et composites : thermoformage, soufflage, injection, RTM, infusion,
- de mise en forme de matériaux à base verre : pressage, soufflage.

Les principaux secteurs industriels d'application sont : l'aéronautique, la métallurgie, l'automobile, la plasturgie, l'industrie du verre.

### Les faits marquants pour 2008

La structuration du CROMeP a été adaptée fin 2008 à celle définie pour l'Institut Clément Ader (voir encart).

Elle se décline en trois équipes, incluse chacune dans un des groupes de ce dernier :

l'équipe SuMO : Surfaces, Matériaux et Outillages, animée par Philippe Lours

l'équipe MaSC : Matériaux et Structures Composites, animée par Fabrice Schmidt

l'équipe MODT : Mesures Optiques Dimensionnelles et Thermiques, animée par Yannick Le Maoult.

L'année 2008 a aussi été marquée par :

24 publications dans des revues internationales à comité de lecture,

la soutenance de 2 thèses,

le démarrage de 7 nouvelles thèses dont 2 CIFRE,

l'organisation de la conférence européenne EuroSPF08 en septembre 2008 à Carcassonne,

le démarrage de deux projets ANR Inter-Carnot (Elico-CP et Cisbat).

### Equipe de recherche SuMO (Surfaces, Matériaux et Outillages)

Les activités de l'équipe SuMO du CROMeP sont principalement orientées vers l'étude des relations entre la microstructure des matériaux et leurs propriétés d'usage, tant volumiques que surfaciques.

A ce titre, l'équipe développe des compétences dans le domaine de la caractérisation des matériaux métalliques à différentes échelles et sous différents types de sollicitations environnementales et/ou thermomécaniques. Afin de compléter cette approche expérimentale, une attention particulière est portée à la modélisation du comportement mécanique des matériaux, qu'il soit statique, cyclique ou dynamique ou encore en relation avec leur endommagement. Notre équipe de recherche situe donc son action à la frontière entre science et génie des matériaux en privilégiant une approche multi-échelles expérimentale et numérique.

Les travaux actuels s'articulent ainsi selon trois axes distincts et complémentaires : i) l'étude des relations entre la microstructure des matériaux et des surfaces et leurs propriétés physico-chimiques et thermomécaniques, ii) l'étude de l'endommagement et vieillissement sous sollicitation mécanique, thermique et environnementale iii) le développement de lois de comportement et de prédiction de durée de vie des matériaux. Plus particulièrement, nos études sont conduites pour les familles de matériaux suivantes : les aciers à outils martensitiques, les aciers à durcissement structural, les aciers réfractaires moulés, les aciers inoxydables ferritiques, les superalliages base nickel, les alliages ODS (Oxide Dispersion Strengthened), les systèmes complexes de barrière thermique. Les savoir-faire de l'équipe sont développés en prospectant tout particulièrement le secteur applicatif de l'aéronautique qui revêt une importance grandissante dans nos activités, mais également celui des équipements de production d'énergie, de la construction automobile et des outillages de mise en forme.

Les activités scientifiques de l'équipe ont été essentiellement conduites dans le cadre de recherches contractualisées. Citons par exemple : les projets EMOA (pôle de compétitivité

AHG) et Formage Avancé (pôle de compétitivité EMC2), le projet ARCELOR sur l'usure des outils d'emboutissage à chaud, les projets ANR CISBAT, AMARAGE, RamdamAero et Genhstok, le projet SITO, les contrats directs industriels avec Faurécia, Akers et Norskhydro.

### **Relations entre la microstructure des matériaux métalliques et des surfaces et les propriétés thermomécaniques**

Les propriétés des matériaux structuraux sont intimement liées à la microstructure développée lors de leur élaboration, de leur mise en forme thermomécanique, de leur traitement thermique, de leur traitement de surface ou encore de leur vieillissement en service. La façon dont la microstructure influence les propriétés est étudiée à différentes échelles.

Dans le cas des aciers martensitiques revenus, deux types d'étude ont été conduites : d'une part, la simulation, à l'aide du code MATCAL développé à l'université de Graz, de la précipitation d'aciers à 5 % de chrome au cours du traitement thermique et la recherche des causes des propriétés mécaniques remarquables d'aciers pour le secteur aéronautique. Les résultats majeurs sont les suivants :

- La simulation de la précipitation a été réalisée pour une nuance X38CrMoV5 et un traitement d'austénitisation suivi d'une trempe et d'un double revenu. Les résultats obtenus en collaboration étroite avec l'équipe qui développe le logiciel sont les natures chimiques, les rayons ainsi que les fractions volumiques des précipités. Ces valeurs sont comparées aux résultats expérimentaux issus de la diffraction des rayons X, de la sonde atomique (collaboration avec l'université de Rouen) et de la diffusion de neutrons aux petits angles (collaboration avec le Laboratoire Léon Brillouin). Un bon accord entre les valeurs expérimentales et calculées est obtenu (moins d'un facteur 2 de dispersion). Les influences d'une addition de cobalt, de nickel, de vanadium et de molybdène ont été décrites avec également une dispersion obtenue du même ordre de grandeur.
- Les analyses microstructurales à l'échelle nanométrique de la précipitation conjointe de composés intermétalliques et de carbures de molybdène ont permis d'émettre des hypothèses pertinentes quant à l'obtention d'un compromis remarquable de propriétés de résistance à la traction et de ténacité. Ces analyses concernent à la fois la détermination de la chimie du précipité, sa densité aux tous premiers instants du revenu ainsi que la nature du site de germination. A la lumière des résultats obtenus, deux nouvelles nuances expérimentales ont été élaborées en fin d'année et feront l'objet d'études similaires en 2009.
- Un banc expérimental de détermination des propriétés de propagation de fissures et de ténacité a été mis en place ; il sera également mis à contribution pour l'étude des aciers réfractaires moulés fortement chargés en nickel utilisés comme matrice de formage superplastique du TA6V.

La caractérisation du comportement des matériaux à l'usure et au frottement constitue un aspect important de nos activités. L'accent est principalement mis sur l'étude de la relation entre la microstructure et les propriétés tribologiques de matériaux métalliques et sur l'élaboration de loi d'endommagement sous sollicitations de frottement. Les thématiques abordées sont le frottement à grande vitesse (application usinage), le frottement en plasticité (application forgeage), le frottement à haute température (application laminage), la mesure de résistance thermique de contact et de l'aire réelle de contact (application emboutissage à chaud) et le frottement sous fortes sollicitations (applications aéronautiques : projet ANR RamdamAero). Parallèlement aux activités de recherche, les activités contractuelles ont porté principalement sur la thématique « essais d'usure à haute température

d'outil d'emboutissage pour la mise en forme de tôle d'acier Usibor 1500 TM ».

Afin de mieux appréhender les processus de déformation de tôle d'aluminium en formage incrémental, des études microstructurales de tôles sont en cours de développement. L'objectif est de cerner les mécanismes microstructuraux mis en jeu et d'optimiser ainsi ce procédé de mise en forme particulièrement prometteur.

### **Endommagement et vieillissement sous sollicitations mécanique, thermique et environnementale**

Des endommagements ou des vieillissements réducteurs des matériaux peuvent se produire en relation avec les conditions spécifiques d'utilisation qui se traduisent par une combinaison, souvent complexe, de sollicitations d'ordre mécanique, thermique et environnemental.

En particulier, notre équipe a développé et mis en service un moyen d'étude de la corrosion sous atmosphères complexes d'alliages à base de nickel, utilisés dans la conception de reformeurs d'hydrogène. Des essais comparatifs sur plusieurs milliers d'heures ont permis de définir les différences de comportement d'une dizaine d'alliages. Cette étude a pour but d'orienter les concepteurs de tels équipements dans le choix des matériaux. L'exploitation des résultats provenant d'échantillons actuellement en cours d'essai permettra de définir et de comprendre les mécanismes de dégradation de ces matériaux.

Egalement, un moyen particulièrement original d'étude et de caractérisation de l'écaillage en cyclage thermique d'alliages ODS et de systèmes de barrières thermiques a été mis au point. Ce moyen offre la possibilité de générer des gradients thermiques dans l'épaisseur des échantillons testés afin de reproduire au mieux les conditions d'utilisation des matériaux industriels. En outre, une instrumentation dédiée, composée d'une caméra CCD à fréquence d'acquisition et résolution variables, permet de suivre en temps réel les cycles thermiques et les endommagements par écaillage associés. Parallèlement, une étude par indentation interfaciale de la résistance à la fissuration des barrières thermiques a été développée. Elle a permis de démontrer que la ténacité interfaciale de tels systèmes diminuait avec la durée de maintien isotherme des barrières à haute température.

Les activités de fatigue isotherme et non-isotherme, thermique et thermomécanique se sont poursuivies. En particulier, l'étude de l'effet de l'environnement sur la durée de vie en fatigue thermique a fait l'objet d'une attention particulière. Les essais de fatigue thermique sous argon et azote concernant des aciers vierges ou revêtus d'un dépôt aluminure rapporté par CVD à 550°C ont montré l'impact de l'environnement sur la durée de vie. Les travaux sur l'effet d'anodisation de surface d'alliages Al ainsi que sur l'effet de la rugosité sur la fatigue se poursuivent en collaboration avec l'ISAE. Les travaux sur la propagation de fissure en fatigue sur des éprouvettes à épaisseur réduite se sont également poursuivis (aciers à outils X35CrMoV5).

### **Lois de comportement des matériaux et prédiction de durée de vie**

Des activités concernant la modélisation du comportement des matériaux ainsi que la prédiction de leur durée de vie sont largement développées au sein de l'équipe. Suivant le contexte et les matériaux étudiés, différentes approches sont considérées (phénoménologiques, empiriques, statistiques). La méthodologie employée est assez proche dans tous les cas. Il s'agit d'abord de développer un cadre de modélisation

et de mettre en place un certain nombre d'essais représentatifs pour identifier les paramètres des modèles. Les lois sont ensuite implantées dans un logiciel éléments finis ce qui permet de valider l'approche en effectuant des simulations numériques sur des structures plus complexes que l'éprouvette de laboratoire (éprouvettes technologiques) pouvant aller jusqu'à la pièce industrielle. De plus, afin de mieux appréhender les champs de déformations induits dans ces structures, une collaboration a été mise en place avec l'équipe MODT afin d'utiliser les mesures de champs cinématiques pour identifier des lois de comportements multiaxiales.

Dans le cadre de la modélisation du comportement inélastique des matériaux, plusieurs aspects ont été développés :

- La modélisation du comportement et de la durée de vie de joints soudés pour collecteur d'échappement automobile s'inscrit dans le cadre d'un contrat de recherche entre le CROMeP, le CEMEF et Faurecia. L'objectif de cette étude consiste à développer un outil de prédiction fiable de la durée de vie de ces structures soudées. Les développements effectués permettent de rendre compte du comportement thermomécanique de la structure soudée ainsi que d'évaluer son endommagement progressif.
- Une étude est menée sur le comportement de tôle d'aluminium en formage incrémental dans le cadre de la tâche simulation du projet « Formage Avancé ». Dans ce travail, un pilote de formage a été conçu et développé afin de pouvoir reproduire des chemins de chargement proches de ceux induits en milieu industriel. Cet équipement a la particularité d'être instrumenté en mesures de champs de déplacement spatial ainsi qu'en mesures d'efforts. La modélisation permet de tenir compte du caractère anisotrope des tôles d'aluminium mises en forme ainsi que de leur comportement plastique. Une étude complémentaire a également été effectuée avec l'entreprise CRYOSPACE ; elle traite plus particulièrement de l'anisotropie des tôles d'aluminium lithium et de la manière de la représenter. Ces travaux se font en collaboration avec l'équipe MODT.
- La modélisation du comportement d'un système mécanique intégrant un revêtement de surface innovant capable d'augmenter la durée de vie des pièces est effectuée dans le cadre du projet ANR RAMDAMAERO. Cette étude consiste à prévoir, par simulation numérique, l'usure du matériau revêtu.
- Les études du comportement et la durée de vie des outillages pour mise en forme à chaud se sont poursuivies afin de pouvoir intégrer les modèles développés dans le logiciel métier Forge. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du projet SITO (SIMulation Tenue Outillage) faisant suite au projet SIMULFORGE. Cette étude fait l'objet d'une collaboration entre industriels du domaine, le CEMEF et le CROMeP.

Dans le cadre de l'optimisation des structures d'outillage d'emboutissage, le logiciel Optistruct a été installé sur nos moyens de calcul. Par ailleurs, l'activité de recherche a concerné la poursuite de deux axes d'études. Le premier concerne l'application de méthodes d'optimisation à la conception géométrique des outillages de découpe. Les travaux effectués ont mis en évidence des efforts transversaux importants qui peuvent atteindre 30% de l'effort normal. Ces efforts ont des conséquences sur le comportement des lames de découpe, notamment en ce qui concerne le contrôle d'un jeu de découpe constant. L'influence du rayon d'outil et du jeu de découpe sur l'effort de presse, la pression de contact et le profil de découpe ont également été étudiés. Une approche d'optimisation multi critères a été mise en place en vue d'obtenir un compromis entre le jeu et le rayon d'outils pour minimiser l'effort de découpe et la pression de contact. Le second porte sur la modélisation de la variation de la rugosité de surfaces avec l'écrasement visant à décrire la variation de la résistance thermique de contact d'une interface tôle/outil en emboutissage à chaud.

## Equipe de recherche MaSC (Matériaux et Structures Composites)

Les travaux de recherche de l'équipe MaSC concernent :

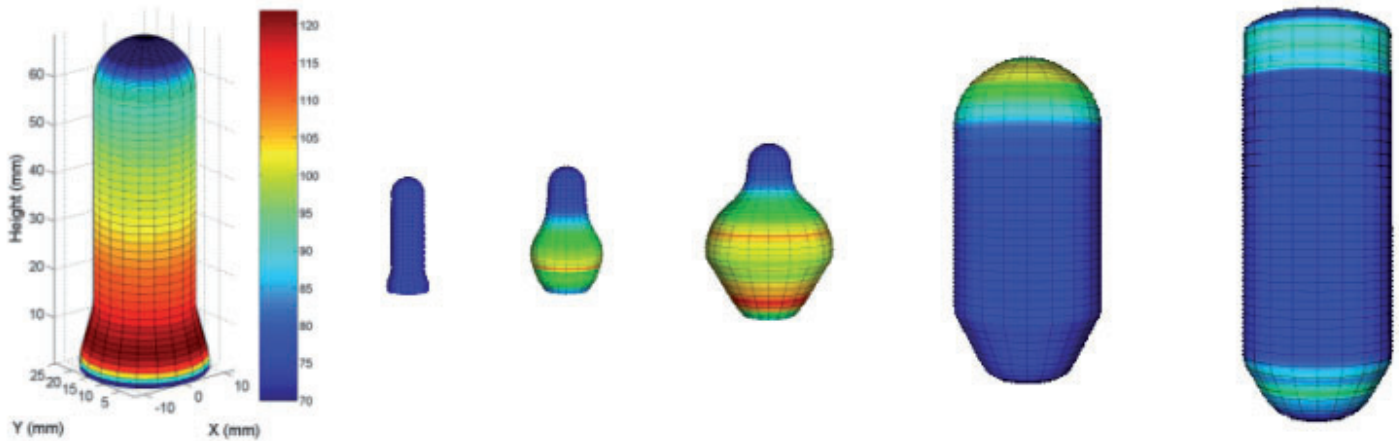
- l'optimisation des procédés polymères et composites en se concentrant principalement sur la problématique de la modélisation des écoulements, de l'étude des transferts thermiques, de l'optimisation des outillages tout en privilégiant une démarche faisant appel à la mise en oeuvre de pilotes de laboratoire,
- tout en étudiant le comportement des matériaux polymères, composites et granulaires, d'un point de vue thermomécanique, rhéologique et rhéocinétique. Une orientation privilégiée vise à établir des relations entre les microstructures et les architectures fibreuses et granulaires avec les propriétés d'usage et tenant compte de l'influence du vieillissement.

### Optimisation des procédés polymères et composites

La mise en oeuvre des matériaux composites par voie liquide (procédés RTM et LRI) ou par stratification induit souvent l'apparition de porosités. Un modèle thermomécanique d'évolution radiale d'une porosité sphérique, couplé à l'équation de diffusion, a été développé. À partir de ce modèle, une procédure d'optimisation à l'aide d'un algorithme type SQP (Sequential Quadratic Programming) a permis de proposer les cycles de pression et de température optimaux (projet EPOC, AIRBUS) en configuration autoclave. Par ailleurs, le développement d'un modèle numérique 3D basé sur la méthode des éléments frontières a été engagé pour permettre des simulations tridimensionnelles du procédé LRI (infusion de composites). La méthode dite « Level Set » est en cours d'implantation afin de calculer précisément la position du front de matière de la résine thermodurcissable (projet FUSCOMP, SOCATA).

L'optimisation des procédés est fortement dépendante des environnements de chauffage et de refroidissement. Dans cette optique, la conception optimale des canaux de refroidissement dans les moules d'injection de pièces thermoplastiques a conduit au développement du logiciel COOL-MOULD, basé sur la méthode des éléments frontières en 3D. La méthode de réduction de modèles a été aussi implantée avec succès afin de réduire le temps de calcul direct (projet européen EUROTOOLING21). Par ailleurs, dans le cadre d'un projet avec la société TOSHIBA-LIGHTING un module avancé de chauffage optimal par rayonnement de corps semi-transparents (thermoplastiques, résines thermodurcissables,...) a été développé sous environnement MATLAB® à l'aide de la méthode des lancés de rayons (RAY-HEAT). L'application à la conception optimale des fours infra rouge se fait par interpolation du terme source radiatif dans un logiciel commercial éléments finis (COMSOL®, ABAQUS®,...).

Dans le cadre de la mise en oeuvre par infusion de renforts tricotés, le logiciel PAM-RTM® est utilisé afin de simuler l'injection d'un corps de vanne papillon afin de vérifier la faisabilité du procédé (temps de remplissage inférieur au temps de gel de la résine). Les simulations doivent permettre d'optimiser les conditions d'injection : position des points d'injection et remplissage de la cavité. La mesure de la perméabilité des renforts tricotés, indispensable pour les simulations numériques, a été réalisée dans les directions principales du tricot pour deux contextures en utilisant les méthodes unidirectionnelles et bidirectionnelles. L'influence du moule (rigide ou flexible) a été mise en évidence. Une étude a aussi mis en exergue l'influence de la pré-déformation en traction dans les directions principales du tricot sur la perméabilité du renfort.



Simulation numérique du soufflage d'une bouteille plastique - Isovaleur de température

De nouveaux procédés d'élaboration des matériaux composites à matrice thermodurcissable basés sur une réduction du temps de polymérisation sont actuellement envisagés industriellement, par exemple par l'utilisation d'outillages chauffés par induction. Toutefois une cuisson trop rapide peut causer des défauts inacceptables pour des pièces aéronautiques (dégradation thermique de la matrice polymère, contraintes résiduelles, déformations, gradients de propriétés dans l'épaisseur pour les pièces de forte section). De tels procédés ne seront viables qu'à travers un pilotage dynamique de la thermique des outillages. Ainsi, dans une première étape, des travaux ont été engagés pour identifier et valider des modèles de polymérisation dans des régimes transitoires rapides pour les pré-imprégnés de la génération actuelle.

Pour cela une campagne d'essai en DSC (Differential Scanning Calorimetry) isotherme et sous rampe de température a été engagée ; en parallèle une méthodologie d'identification des paramètres des modèles est développée sous MATLAB. L'optimisation des cinétiques de chauffage et de refroidissement dans les procédés d'estampage de composites thermoplastiques et/ou de réticulation de composites à matrice thermodurcissable sera réalisée à l'aide du pilote procédé EdyCo en cours de développement au sein du laboratoire. Il est composé notamment d'un générateur d'induction, d'une presse hydraulique d'estampage et de moules Roctool®.

### Comportements des matériaux polymères, composites et granulaires

L'équipe développe également une thématique de recherche sur l'étude expérimentale et la modélisation du comportement des textiles techniques tricotés. Celle-ci a été initiée dans le cadre des appels à projets EPICEA (Emergence de Projets Innovants Composites portés par des Entreprises Aéronautiques) en partenariat étroit avec une PME du textile.

Des méthodes expérimentales permettant d'étudier le comportement en déformation uniaxiale, cisaillement plan et en déformation transverse de préformes textiles tricotées ont été développées. L'objectif est de disposer d'une méthodologie pour permettre de contribuer à l'amélioration des performances des préformes textiles directement à partir d'essais sur textiles et de pouvoir établir un lien entre le comportement au niveau textile et les performances du composite, ceci en particulier pour ces textiles relativement déformables. Les travaux actuels portent principalement sur des tricotés à maille « jersey » et « côte » élaborés à partir de fibre de verre, de basalte et de carbone. Après injection, des études sur le comportement et l'endommagement après impact et en assemblage sont menés en collaboration avec l'ISAE dans le cadre du projet CORTEX (Composites à Renforts Textiles).

Les composites élaborés par infusion hors autoclave permettent une économie importante notamment au niveau du coût autoclave. La variation des propriétés mécaniques de composites infusés en relation avec le procédé est étudiée en réalisant des plans d'expériences sur des composites à base de tissu carbone quadriaux (NCF) et de résine RTM6.

Les paramètres procédé tels que les températures (résine, moule, cuisson), et des paramètres technologiques comme le drainant et le nombre de couches de tissus à imprégner ont été pris en compte. La dépendance des propriétés mécaniques de ces composites aux conditions de fabrication (procédé) est quantifiée à l'aide d'essais mécaniques de traction de compression de cisaillement, de DMA (Dynamic Mechanical Analysis). Par ailleurs, en vue des simulations numériques à l'aide du logiciel PAM-RTM, une modélisation rhéocinétique de la résine a également été réalisée et un diagramme TTT (Temps-Température-Transformation) de la résine RTM6 a été obtenu.

Les études du renforcement de bétons réfractaires par des fibres minérales ont montré la capacité d'un tel renforcement à améliorer le comportement thermomécanique des bétons à base d'oxydes considérés. Dans les composites développés, le renforcement par des fibres de verre ou par des fibres riches en alumine permet de retarder l'apparition de l'endommagement dans la plage de températures 110°C-800°C, plage de faibles performances des bétons réfractaires en raison des phénomènes de déshydratation de la matrice cimentaire. A plus haute température (plage 900°C-1200°C), le renforcement par des fibres riches en alumine permet également d'améliorer le comportement viscoplastique des bétons considérés. L'étude des évolutions microstructurales aux interfaces fibre/matrice a permis d'obtenir une meilleure compréhension des mécanismes responsables de ces améliorations.

Les études de trois familles de réfractaires à base d'agrégats de carbure de silicium (SiC) ont montré la complexité des évolutions de leur comportement thermomécanique dans la plage de températures 20°C-1200°C (projet ANR DRuIDE). Ces familles de matériaux se différencient par la nature des phases qui lient les agrégats. Cette liaison est soit de type cimentaire, soit de type oxyde, soit de type nitrure. Des corrélations ont pu être établies entre les évolutions de comportement thermomécanique observées et les transformations de phase qui opèrent dans chacune de ces familles. Ces matériaux ont comme caractéristique commune d'être sensibles à l'oxydation. Une étude cinétique et physico-chimique des mécanismes d'oxydation sous air ambiant des matériaux à base SiC et à liaison nitrure (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) a en particulier été engagée.

La complexité de l'architecture microstructurale de ces matériaux conduit à des processus d'oxydation à leur tour complexes. Au plan expérimental, la caractérisation est abordée en déterminant des cinétiques de prise de masse, en déterminant la nature cristallographique des oxydes formés et en quantifiant les évolutions du réseau de porosité de ces matériaux. La modélisation cinétique des processus d'oxydation est en cours.

### Equipe de recherche MODT (Mesures Optiques Dimensionnelles et Thermiques)

L'équipe « Mesures Optiques Dimensionnelles et Thermiques (MODT) » s'intéresse au développement de méthodes/ de systèmes de mesure dimensionnelle et/ou thermique pour l'étude du comportement des matériaux et des structures et la surveillance des outillages et des procédés. Les travaux privilégient le développement de méthodes de mesure sans contact et de champs (par opposition aux méthodes ponctuelles) basées sur l'optique ou l'imagerie numérique (caméras). Des mesures par capteurs à fibre optique à réseaux de Bragg sont également mises en œuvre.

L'équipe MODT participe activement aux travaux du GDR CNRS 2519 « Mesures de champs et identification en mécanique des solides », au sein de ses 3 groupes de travail « Métrologie », « Identification » et « Thermographie ».

### Mesure de champs cinématiques (formes, déplacements, déformations) et identification

L'équipe MODT a acquis une grande expérience en matière de mesure de formes/déplacements/déformations par corrélation d'images et en particulier par stéréo-corrélation, pour résoudre un large spectre de problèmes allant de l'échelle macro à l'échelle micro/nano. Les travaux sur la stéréo-corrélation (2 caméras) et la vidéogrammétrie (1 caméra) ont été étendus ces dernières années aux mesures multi-caméras (plus de 2 caméras), ce qui a conduit à traiter des problématiques telles que le calibrage d'un système multi-caméras, l'appariement par corrélation multi-images, la reconstruction 3D par triangulation multi-images et par ajustement de faisceaux (bundle adjustment). Ces travaux ont été appliqués (i) à l'inspection de pièces aéronautiques pour la détection de défauts de formes, en partenariat avec AIRBUS et le LAAS-CNRS, et (ii) à l'instrumentation d'un pilote de formage incrémental de tôle dans le cadre du projet « Formage Avancé » du pôle de compétitivité EMC2.

Les mesures de champs fournissent un grand nombre de données expérimentales. L'utilisation efficace de ces données pour l'identification du comportement des matériaux nécessite la mise en œuvre de méthodes spécifiques. Tout d'abord des travaux ont été menés sur l'identification à partir de mesures de champs en grandes déformations appliquée au soufflage d'élastomère. La deuxième application est liée à l'identification de lois de comportement anisotrope en formage incrémental de tôle. L'instrumentation multi-caméras du pilote de formage incrémental évoquée plus haut a été mise en œuvre dans ce contexte. Un certain nombre de travaux d'identification des paramètres d'écrouissage ont été menés sur différentes géométries 2D. Il a été démontré que l'aptitude à identifier correctement ces paramètres dépend de l'amplitude du domaine de déformation accessible dans le plan ( $\epsilon_1, \epsilon_2$ ) lors de l'essai considéré. Un certain nombre d'essais associés à des mesures de champs de déformation in situ lors du formage incrémental de tôle ont aussi été menés cette année.

### Capteurs à fibre optique à réseaux de Bragg

Les capteurs à fibre optique à réseaux de Bragg (FBG) sont particulièrement intéressants pour mesurer les déformations et la température (aptitude au multiplexage, faible intrusivité, grande sensibilité thermo-mécanique, capteurs répartis, etc.). Des compétences ont été développées dans l'utilisation de ce genre de capteur, notamment pour le suivi des paramètres de procédés de fabrication : collaborations avec l'équipe LGMT/Pro2Com, travaux en partenariat avec l'équipe SMS de l'Ecole des Mines de St-Etienne sur le découplage entre la mesure de déformation et de température et sur l'identification de déformation ou température non uniforme le long d'un réseaux de Bragg.

En partenariat avec le laboratoire Hubert Curien (UMR CNRS 5516) de St Etienne, un capteur à base d'un réseau standard (à courte période) et d'un réseau longue période (LPG) superposés permettant de discriminer de manière intrinsèque les informations de température et de déformation longitudinale est en développement. Une optimisation des paramètres d'inscription des réseaux a été menée pour cibler les plages spectrales intéressantes, et un certain nombre d'essais thermo-mécaniques de validation sont en cours (notamment pour le suivi du procédé composite d'infusion de résine LRI).

Enfin, en partenariat avec le CEA/LIST, un projet ANR Inter-Carnot (ELICo-CP) relatif au développement et aux tests d'un capteur de pression de contact faiblement intrusif susceptible d'être intégré dans les outillages (moules) de fabrication des pièces composites en autoclave / RTM a démarré.

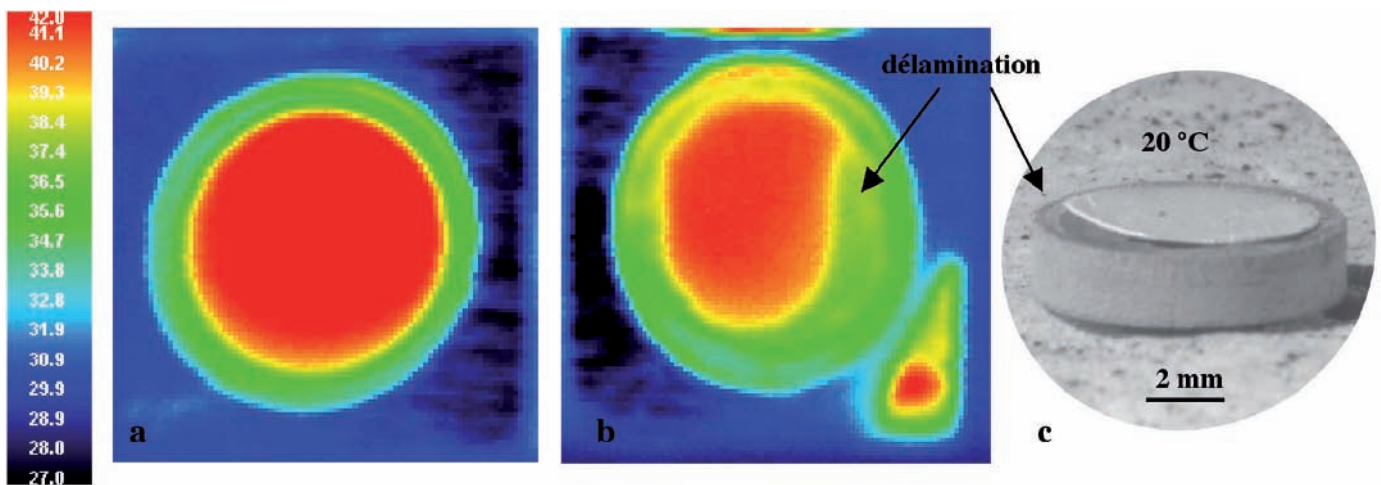
### Mesure de champs de températures et de grandeurs thermiques

L'équipe MODT développe également une activité dans le domaine de la mesure sans contact de champs de températures et de grandeurs thermiques. Des caméras de thermographie « classiques » (bandes 3-5  $\mu\text{m}$  et 8-12  $\mu\text{m}$ ) et plus récemment des caméras dans le domaine spectral du proche infrarouge ont été utilisées.

Une activité de métrologie thermique spécifique a également été mise en œuvre sur les matériaux céramiques (ZrO<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Ainsi, en 2008, les travaux ont été focalisés sur la finalisation du banc EVE. Les travaux de recherche ont porté sur l'étude de l'oxydation d'un matériau industriel aluminofacteur et ont permis de réaliser une analyse approfondie

des mécanismes de développement de la couche d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  sur le substrat métallique (cinétique de croissance de cette couche, mécanismes d'endommagement de celle-ci lorsqu'on soumet le matériau à de fortes variations de température). L'approche utilise une technique originale basée sur l'observation in situ de la surface des échantillons par vidéométrie ce qui donne accès en temps réel à la morphologie des écailles formées durant l'endommagement en relation avec la microstructure du substrat entre autres. La taille des écailles observées a également pu être corrélée à l'épaisseur de la couche d'oxyde et à une température critique  $T_c$  d'initiation du phénomène par le biais du modèle d'Evans. L'ensemble des résultats présentés dans cette première partie du travail a donc permis de proposer une contribution nouvelle et reconnue sur l'endommagement des couches d'oxyde.

La deuxième partie du travail a été consacrée à l'étude des barrières thermiques aéronautiques ; elle a permis, en particulier, de valider le fonctionnement du pilote EVE et notamment sa capacité à gérer des cycles thermiques requis dans le test de ces couches protectrices c'est à dire des successions de cycles complets d'une 1h30 environ incluant la montée en température du revêtement, le maintien en palier (~1 heure) et le refroidissement. Un soin particulier a donc été apporté à la mesure et au contrôle des températures à l'aide de thermocouples et d'un pyromètre infrarouge. Les premiers cyclages de barrières thermiques ont été réalisés et ont permis de mettre en évidence la cinétique d'endommagement relative à ce type de matériau spécifique. L'ensemble de ces travaux a permis de disposer aujourd'hui, au CROME<sub>P</sub>, d'un moyen d'essais original, innovant et relativement unique (seulement quelques exemplaires dans le monde).



Cartographie de température d'une barrière thermique délaminée

### Mesure de température vraie proche infrarouge

Historiquement, cette activité est basée sur la thermographie proche infrarouge matricielle qui est la mesure de température apparente (ou corps noir) à partir de caméras proche infrarouge basées sur des détecteurs Silicium ou InGaAs. Ces travaux se différencient de la thermographie traditionnelle sur deux points fondamentaux :

- le domaine spectral de mesure, le proche Infra Rouge [0,4-1,7  $\mu\text{m}$ ], éloigné des domaines classiques infrarouges [3-5  $\mu\text{m}$ ] et [8-12  $\mu\text{m}$ ] introduit un certain nombre de spécificités sur les propriétés de la source mesurée, la transmission du milieu atmosphérique et les hypothèses du modèle radiométrique (relation entre le signal délivré par le détecteur et la valeur de la température).
- la forme matricielle du détecteur qui est constitué d'une multitude de photo-éléments avec des performances différentes en termes de bruit et de sensibilité en raison des imperfections du procédé de fabrication. La spécificité des travaux réside alors dans le souci de modéliser et de caractériser le plus finement possible ces caméras et de développer un modèle radiométrique spécifique pour la thermographie proche infrarouge matricielle.

En 2008, ces travaux se sont poursuivis avec la prise en compte des grandeurs d'influence liées à l'environnement pour conduire à des mesures de températures vraies auxquelles il est possible d'associer une incertitude de mesure.

D'une part, le projet ANR « Real Time True Temperature measurement (R3T) », mené en partenariat avec deux laboratoires (le LAAS-CNRS et le PROMES-CNRS) et la société AREVA, vise le développement d'un système de mesure en ligne de températures vraies dans la bande spectrale proche infrarouge. Son originalité est de fusionner des mesures de température de luminance réalisées sur la base de la thermographie proche infrarouge matricielle, des mesures de forme obtenues par reconstruction tri-dimensionnelle infrarouge et des mesures sur les propriétés de surface (réflectivité et émissivité) développées à l'aide d'une technique appelée réflectométrie.

D'autre part, la mesure de caractéristiques dimensionnelles (forme, déplacement, déformations) à chaud implique de considérer les effets « mirages », liés au fort gradient de l'indice de réfraction près de la surface de l'objet, et dus aux champs convectifs apparaissant autour des objets portés à haute température. Dans ce contexte, une nouvelle thèse vient également de démarrer en collaboration avec l'Institut Von Karman (Bruxelles) pour développer des moyens de visualisation et de quantification des champs convectifs.

## RÉSULTATS SCIENTIFIQUES

## Articles de périodique

**ORTEU Jean-José, ROTROU Yann, SENTENAC Thierry, ROBERT Laurent**

*An innovative method for 3-D shape, strain and temperature full-field measurement using a single type of camera : principle and preliminary results*  
EXPERIMENTAL MECHANICS, vol.48, n° 2, p.163-179, 2008

**ZHANG Zhanping, BERNHART Gérard, DELAGNES Denis**

*Cyclic behaviour constitutive modelling of a tempered martensitic steel including ageing effect*  
INTERNATIONAL JOURNAL OF FATIGUE, vol.30, n° 4, p.706-716, 2008

**RISHMANY Jihad, MABRU Catherine, CHIERAGATTI Rémy, REZAI-ARIA Farhad**

*Simplified modelling of the behaviour of 3D-periodic structures such as aircraft heat exchangers*  
INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICAL SCIENCES, vol.50, n° 6, p.1114-1122, 2008

**MEDJEDOUB Farid, DOUR Gilles, LE ROUX Sabine, LAMESLE Pascal, SALEM Mehdi, HAIRY Patrick, REZAI-ARIA Farhad**

*Experimental conditions and environment effects on thermal fatigue damage accumulation and life of die-casting steel X38CrMoV5 (AISI H11)*  
INTERNATIONAL JOURNAL OF MICROSTRUCTURE AND MATERIALS PROPERTIES, vol.3, n° 2-3, p.336-349, 2008

**VELAY Vincent, BERNHART Gérard, DELAGNES Denis**

*Identification and validation of a continuum damage model applied for the lifetime prediction of H11 tool steel*  
INTERNATIONAL JOURNAL OF MICROSTRUCTURE AND MATERIALS PROPERTIES, vol.3, n° 2-3, p.282-296, 2008

**DOUR Gilles, MEDJEDOUB Farid, DIACONU Gabriel, GIRARDIN Denis, MICHRAFY Abderrahim, LOULOU Tahar, REZAI-ARIA Farhad**

*Size effect in transient thermal fatigue testing and thermo-mechanical screening of coatings*  
INTERNATIONAL JOURNAL OF MICROSTRUCTURE AND MATERIALS PROPERTIES, vol.3, n° 2-3, p.311-325, 2008

**AHMER Zeeshan, VELAY Vincent, BERNHART Gérard, REZAI-ARIA Farhad**

*Cyclic behaviour simulation of X38CrMoV5-47HRC (AISI H11) tempered martensitic hot work tool steel*  
INTERNATIONAL JOURNAL OF MICROSTRUCTURE AND MATERIALS PROPERTIES, vol.3, n° 2-3, p.326-335, 2008

**DAFFOS Christophe, LAMESLE Pascal, REZAI-ARIA Farhad**

*Fatigue-oxidation interaction models for life prediction of hot forming tools steels under transient thermomechanical loadings*  
INTERNATIONAL JOURNAL OF MICROSTRUCTURE AND MATERIALS PROPERTIES, vol.3, n° 2-3, p.350-362, 2008

**DARGUSCH Matthew, HAMASAIID Anwar, DOUR Gilles**

*An inverse model to determine the heat transfer coefficient and its evolution with time during solidification of light alloys*  
INTERNATIONAL JOURNAL OF NONLINEAR SCIENCES AND NUMERICAL SIMULATION, vol.9, n° 3, p.275-282, 2008

**CALIOT Cyril, EYMET Vincent, EL HAFI Mouna, LE MAOULT Yannick, FLAMANT Gilles**

*Parametric study of radiative heat transfer in participating gas-solid flows*  
INTERNATIONAL JOURNAL OF THERMAL SCIENCES, vol.47, n° 11, p.1413-1421, 2008

**CALIOT Cyril, FLAMANT Gilles, EL HAFI Mouna, LE MAOULT Yannick**

*Assessment of the single-mixture gas assumption for the correlated K-distribution fictitious gas method in H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CO mixture at high temperature*  
JOURNAL OF HEAT TRANSFER, vol.130, n° 10, art. 104501, 2008

**VELAY Vincent, DELAGNES Denis, BERNHART Gérard**

*Advances in cyclic behavior and lifetime modeling of tempered martensitic steels based on microstructural considerations*  
KEY ENGINEERING MATERIALS, vol. 378-379, p.81-100, 2008

**LOURS Philippe, SNEZEWSKI Julien, LE MAOULT Yannick, PIERAGGI Bernard**

*Direct observations and analysis of the spallation of alumina scales grown on PM2000 alloy*  
MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING. A, STRUCTURAL MATERIALS, vol.480, n°1-2, p.40-48, 2008

**LAMESLE Pascal, SALEM Mehdi, LE ROUX Sabine, DOUR Gilles, REZAI-ARIA Farhad**

*Oxidation and corrosion effects on thermal fatigue behaviour of hot work tool steel X38CrMoV5 (AISI H11)*  
MATERIALS SCIENCE FORUM, vol. 595-598, p.789-796, 2008

**SNEZEWSKI Julien, LE MAOULT Yannick, LOURS Philippe**

*In situ thermal gradient controlled investigation of spallation - Experimental design and preliminary results*  
MATERIALS SCIENCE FORUM, vol. 595-598, p.1135-1143, 2008

**BERNHART Gérard, NAZARET Fabien, CUTARD Thierry**

*Fiber reinforced refractory castables for SPF toolings*  
MATERIALWISSENSCHAFT UND  
WERKSTOFFTECHNIK, vol.39, n° 4-5, p.317-321, 2008

**GUICHON Maelle, BOHER Christine, HASSOUNE-  
RHABBOUR Bouchra, SCHMIDT Fabrice, BAZIARD  
Yves**

*Identification des contraintes de rupture et de cisaillement à  
l'interface polymère injecté-moule métallique à l'aide du test  
couronne*  
MATERIAUX ET TECHNIQUES, vol.96, n° 1-2, p.65-78,  
2008

**HAMASAIID Anwar, DOUR Gilles, DARGUSCH  
Matthew, LOULOU Tahar, DAVIDSON Cameron,  
SAVAGE Gary**

*Heat transfer coefficient and in-cavity pressure at the  
casting-die interface during high-pressure die casting of the  
magnesium alloy AZ91D*  
METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS.  
A, vol.39A, n° 4, p.853-864, 2008

**SUTTON Michael A., YAN Jun Hui, TIWARI Vikrant,  
SCHREIER Hubert W., ORTEU Jean-José**

*The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image  
correlation measurements*  
OPTICS AND LASERS IN ENGINEERING, vol.46, n° 10,  
p.746-757, 2008

**REGNIER Gilles, DRAY Delphine, JOURDAIN Eric,  
LE ROUX Sabine, SCHMIDT Fabrice**

*A simplified method to determine the 3D orientation of an  
injection molded fiber-filled polymer*  
POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE, vol.48, n° 11,  
p.2159-2168, 2008

**HERNY Emilie, LOURS Philippe, ANDRIEU Eric,  
CLOUE Jean-Marc, LAGAIN Philippe**

*Evolution of microstructure and impact-strength energy in  
thermally and thermomechanically aged 15-5 PH*  
PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF  
MECHANICAL ENGINEERS. PART L, JOURNAL OF  
MATERIALS : DESIGN AND APPLICATIONS, vol.222, n°  
4, p.299-304, 2008

**DUCHOSAL Arnaud, DESCHAUX-BEAUME Frédéric,  
BORDREUIL Cyril, FRAS Gilles, LOURS Philippe**

*Method for predicting risk of cracking during weld repair of  
heat resistant cast steels*  
SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WELDING AND  
JOINING, vol.13, n° 2, p.126-135, 2008

**NGUYEN Dan Huy, LAZARD Myriam, BILTERYST  
François, LAMESLE Pascal, DOUR Gilles**

*Modelling the brazed assembly by the coupling of the  
eXtended finite element and the matched asymptotic  
development methods*  
INTERNATIONAL JOURNAL OF MATHEMATICAL  
MODELS AND METHODS IN APPLIED SCIENCES, vol.2,  
n° 3, p.321-331, 2008

**BERTHET Florentin**

*Calcul et expériences sur le profil du front de résine en  
infusion*  
REVUE DES COMPOSITES ET DES MATERIAUX  
AVANCES, vol.18, n° 3, p.375-391, 2008

## Thèses

**SNIEZEWSKI Julien, LOURS Philippe (Directeur),  
LE MAOULT Yannick (Directeur)**

*Etude in situ de l'écaillage des oxydes et des systèmes  
complexes de barrière thermique*  
EMAC, 2008, Albi, FRANCE  
Ecole doctorale : INSTITUT NATIONAL  
POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

**MAURIES Sébastien, DELAGNES Denis (Directeur)**

*Caractérisation et modélisation de la séquence de  
précipitation de carbures au cours du traitement thermique  
d'aciers martensitiques alliés*  
EMAC, 2008, Albi, FRANCE  
Ecole doctorale : INSTITUT NATIONAL  
POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

**16 conférences internationales avec actes  
5 conférences nationales avec actes  
27 autres communications sans actes**

Pour consulter la totalité des publications  
des centres de recherche, vous pouvez vous  
rendre à l'adresse suivante :  
<http://catdoc.enstimac.fr:8080/>

## E nseignement

**Le centre pilote les deux options de dernière année  
Matériaux pour l'Aéronautique et le Spatial (MAS) et  
Ingénierie des Matériaux (IM).**

## Le CROMeP et la Société RocTool



Le CROMeP et la société RocTool ont signé un accord de licence à l'occasion de la journée d'ouverture du salon JEC2008 à Paris.

Par cet accord le CROMeP disposera d'une licence exclusive sur le territoire français (pour une durée de 3 ans) du procédé «Cage System» pour la recherche universitaire et partenariale sur les matériaux composites pour les applications aéronautiques.

Les travaux de recherche devraient permettre de démontrer que ce procédé permet des gains importants par réduction des cycles de production de pièces therm durcissables et thermoplastiques.

L'INSA Toulouse, l'ISAE (Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace), l'Université Paul Sabatier et l'EMAC ont décidé de renforcer la fédération de laboratoires pré-existante en créant l'**Institut Clément Ader**.

Structuré en quatre groupes de recherches :

- SUMO (Surface, Usinage, Matériaux et Outillages),
- MSC (Matériaux et Structures Composites),
- MS2M (Modélisation des Structures, Systèmes et Microsystèmes),
- MCS (Mesure, Contrôle et Surveillance),

L'institut Clément Ader développe des méthodes et outils pour la conception des produits de haute technologie. Les domaines visés sont ceux de l'ingénierie des systèmes, des structures et des procédés, orientée en grande partie vers les applications aéronautiques. Les secteurs de la mécanique des matériaux, des micro-systèmes et de la mesure seront aussi des champs d'action concernés.

Ce renforcement de la collaboration entre les structures a aussi des objectifs liés aux développements académique et économique régionaux :

- en devenant un acteur de premier rang du PRES Université de Toulouse et un partenaire de premier rang des entreprises locales,
- en initiant des grands projets de recherche et en s'impliquant activement dans des projets fédérateurs portés par le pôle Aerospace Valley,
- en développant des compétences utiles aux industries de la région et en participant au transfert de technologies.



## Bruno VERLON

Directeur

☎ : 05 63 49 30 10

✉ : bruno.verlon@mines-albi.fr

## Alain BONNAFÉ

Directeur Adjoint

☎ : 05 63 49 30 20

✉ : alain.bonnafe@mines-albi.fr

## Danielle DOLMIÈRE

Directrice des Etudes

☎ : 05 63 49 30 41

✉ : danielle.dolmiere@mines-albi.fr

## René DAVID

Directeur de la Recherche

☎ : 05 63 49 30 51

✉ : rene.david@mines-albi.fr

## Jean-Michel ALAVERDOV

Délégué à l'Action Economique

☎ : 05 63 36 53 40

✉ : jean-michel.alaverdov@mines-albi.fr

## Jacques SCHWARTZENTRUBER

Délégué à l'Action Internationale

☎ : 05 63 49 32 83

✉ : jacques.schwartzentruber@mines-albi.fr

## Claire BERNIGOLE

Déléguée à la Communication

☎ : 05 63 49 30 95

✉ : claire.bernigole@mines-albi.fr

## Alain de RYCK

Directeur du Centre de Recherche d'Albi en génie des Procédés des Solides Divisés, de l'Energie et de l'Environnement (RAPSODEE)

☎ : 05 63 49 31 58

✉ : alain.deryck@mines-albi.fr

## Gérard BERNHART

Directeur du Centre Recherche Outillages Matériaux et Procédés (CROMeP)

☎ : 05 63 49 30 79

✉ : gerard.bernhart@mines-albi.fr

## Lionel DUPONT

Directeur du Centre de Recherche Génie Industriel

☎ : 05 63 49 32 62

✉ : lionel.dupont@mines-albi.fr

## Vos contacts à l'InSIC

### Claude BARLIER

Directeur de l'InSIC

☎ : 03 29 42 18 21

✉ : claude.barlier@insic.fr

### Mohammed NOUARI

Directeur de la Recherche de l'InSIC

☎ : 03 29 42 22 26

✉ : mohammed.nouari@insic.fr

# www.mines-albi.fr

## Ecole des Mines d'Albi-Carmaux

Campus Jarlard - 81013 ALBI CT Cedex 09 - Tél. : 05 63 49 30 00 - Fax : 05 63 49 30 99