

## *Centre des Matériaux - Pierre Marie FORT*



**Centre des matériaux PM Fourt de MINES ParisTech, CNRS UMR 7633,**

**adresse postale : BP 87, 91003 Evry, France**

adresse physique : 63-65 rue Henri Auguste DESBRUERES, 91 Corbeil-Essonnes

**<http://www.mat.mines-paristech.fr>**

**Tél : (33) 01.60.76.30.00**

## Editorial

Depuis bientôt 10 ans, le Centre des Matériaux propose une Newsletter, «La Tribune» (à voir ici). Elle a évolué au fil du temps, passant peu à peu de la notice à usage interne à un support informatif sur les activités en recherche et enseignement portées par le Centre des Matériaux.

Il est temps de vous proposer d'en bénéficier, sous la forme d'un «Bulletin du CDM». A raison de 4 numéros annuels, vous aurez une vision précise des études engagées avec nos thèses doctorales, des publications éditées par nos chercheurs, des séminaires thématiques organisés régulièrement au Centre, de la vie du mastère spécialisé "Design des Matériaux et des Structures", des nouveaux équipements disponibles, etc.

Bien que déposé sur notre site internet, ce bulletin, se voulant un lien avec nos partenaires privilégiés, sera également distribué grâce à une liste d'abonnés, permettant ainsi à ces derniers de se tenir facilement au courant des activités du Centre des Matériaux.

Au sommaire de ce trimestre, nous revenons sur les succès engrangés au cours de l'été par certains de nos chercheurs. La reconnaissance de leur travaux est l'occasion de mettre en lumière les avancées scientifiques qu'ils permettent.

Et les jeunes chercheurs, entendez les doctorants, s'initient à la présentation orale et leur propre management en présentant, au bout d'environ 9 mois de thèse, un premier bilan et une projection sur les deux ans à venir. Un exercice délicat qui conditionne la suite de leur thèse.

Enfin, vous trouverez toujours dans nos revues un point kiosque autour de nos publications, tant il est vrai que la science se partage.

N'hésitez pas, abonnez vous!

*Françoise DI RIENZO*  
rédatrice

## SOMMAIRE juin - juillet - août 2016



**T. MORGENEYER**  
Prix scientifique  
pour une réponse  
P. 3



**M. JEANDIN**  
expert en  
revêtements  
P. 4-5



**L. LAIARINDRASANA**  
à ACE-X 2016  
P. 6



Synchrotron et  
tomographie  
Séminaire CDM  
P. 6



3 chercheurs au 3DMS  
P. 7



soutenance thèse de  
**J. CABALLERO**  
P. 7



Publications du CDM  
P. 7-8



Présentations des doctorants en  
1ère année de thèse  
P. 9-20



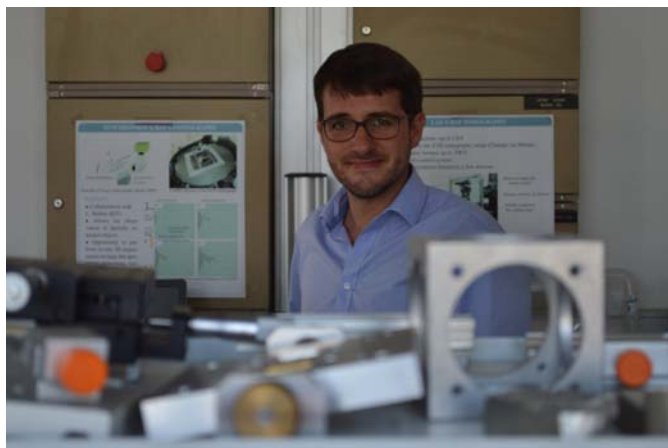
## *Thilo MORGENEYER : bonne réponse*

### **Diplômé franco-allemand**

Après un double diplôme effectué entre la Technische Universität Braunschweig (Allemagne) et l'Université de Technologie de Compiègne, Thilo MORGENEYER soutient en 2008 une thèse sur le sujet 'Micromechanical studies and modelling of toughness in high strength aluminium alloys' à l'Université de Southampton (UK) et au Centre des Matériaux de MINES ParisTech (France).

### **Chercheur au CDM depuis 2008**

Recruté au Centre dès sa soutenance, Thilo a soutenu son Habilitation à Diriger des Recherches en 2014 et occupe un poste de maître de recherche depuis fin 2015.



### **Poseur de question**

Du 1er au 3 juin 2016, il était présent à Compiègne au Symposium ICACM « International Center for Applied Computational Mechanics », colloque annuel destiné à promouvoir les recherches franco-américaines en mécanique numérique. C'est sous la forme d'un poster qu'il avait choisi d'y présenter ses dernières recherches relatives à l'observation des mécanismes d'endommagement dans les métaux à l'aide de la tomographie/laminographie. Ce poster, intitulé « Strain and Damage Interactions During Ductile Tearing: 3D in situ Measurements and Simulations », a été primé par le jury du symposium.

Laissons Thilo nous préciser ce que présente ce poster :

"Ce poster synthétise le travail de plusieurs partenaires, travail qui m'a permis de répondre à une question restée ouverte en rupture ductile « Est-ce l'endommagement qui crée des localisations de déformation dans les matériaux par adoucissement, ou une localisation de déformation qui précède l'endommagement ? »

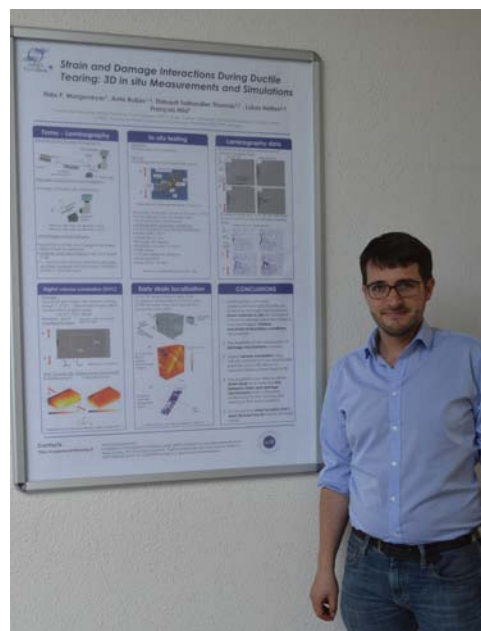
On illustre ici comment, à partir d'essais de chargement sur des structures minces, on a pu suivre l'évolution de l'endommagement et utiliser la Corrélation d'Images Volumique (CIV) pour atteindre les champs de déplacement

puis de déformation au fur et à mesure du chargement, permettant ainsi d'en suivre l'histoire de façon non-destructive et en 3 dimensions. Nous avons démontré que la déformation se localise sous forme de bandes et génère seulement par la suite de l'endommagement.

### **Un travail collaboratif**

Ce travail s'est appuyé sur des collaborations : européenne avec l'Allemagne et l'Institut IPS au KIT qui a développé la laminographie au synchrotron Européen (ESRF) de Grenoble où nous avons pu faire les essais dans de très bonnes conditions expérimentales, et francilienne, avec le LMT Cachan pour la CIV au travers de l'appui financier de la Fédération Francilienne de Mécanique et par la suite grâce au projet ANR COMINSIDE.

Les relations avec l'Institut IPS sont maintenant confortées grâce à un contrat de coopération avec l'Ecole des mines-Armines.



### **Explorations à venir**

Cette technique d'investigation nous permet d'envisager de nombreuses explorations d'autres matériaux et d'autres modes de chargement qui permettront de mieux comprendre les relations entre endommagement et déformation. C'est l'objet du projet ANR COMINSIDE « Compréhension, observation, modélisation et simulation des mécanismes d'endommagement ductile », auquel participe également le CEMEF pour la modélisation de la microstructure observée et son évolution sous chargement mécanique."

Ces recherches intéressent les industriels qui cherchent à améliorer leurs microstructures et à mieux prédire le comportement des matériaux en service.

contact : [thilo.morgeneyer@mines-paristech.fr](mailto:thilo.morgeneyer@mines-paristech.fr)

## Michel JEANDIN, expert en revêtements

### Un Club pour se connaître



Cold Spray Club ; c'est le nom du groupement des utilisateurs de la technologie Cold Spray, technique innovante et reconnue de dépôts de couches minces, fondé et animé depuis maintenant 10 ans, par Vincent GUIPONT et Michel JEANDIN, respectivement chargé de recherche et directeur de recherche au Centre des Matériaux de MINES ParisTech.

Fort de ses 70 membres individuels, répartis dans une quinzaine de pays, le Club a lancé cet été son nouveau site web (<http://coldsprayclub.mines-paristech.fr/Welcom/>) sur lequel on peut suivre la vie du Club, au travers notamment de ses participations à des conférences internationales.

### Reconnaissance de ses pairs

C'est ainsi que du 29 juin au 1<sup>er</sup> juillet 2016 a eu lieu à Milan (Italie) la 30<sup>ème</sup> conférence internationale « Surface Modification Technologies » pour laquelle Michel JEANDIN faisait partie du comité scientifique. Il était cependant à cette même période à Graz (Autriche) pour une autre conférence internationale « THERMEC ' 2016 ». Cet événement, majeur pour les activités matériaux-procédés-traitements, a réuni environ 1250 participants venus de tous horizons. Michel y a présenté l'exposé d'ouverture de la session « Traitements de surface », « An artistic approach to thermal spray » (Michel JEANDIN, François BORIT, Nicole FABREGUE, Gilles ROLLAND, Francesco DELORO, Armines/MINES ParisTech (France)) et a co-signé une autre présentation « Deposition and characterization of boron-carbon-nitrogen (BCN) thin films for wear-resistant applications » (Tolga TAVSANOGLU, Michel JEANDIN, Okan ADDEMIR, Mugla Sitki Kocman University (Turkey)).

Lors du dîner de gala de la conférence, Michel JEANDIN s'est vu attribuer le prix

« THERMEC ' 2016

distinguished award »,

prix qui vient saluer l'ensemble de sa carrière dans le domaine des matériaux.



Cette distinction est l'occasion de revenir, avec son aide, sur le parcours scientifique de Michel JEANDIN.

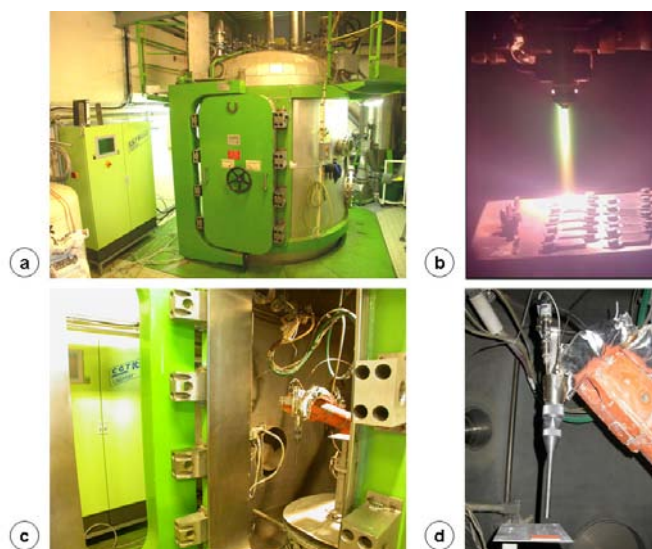
### Chercheur au CDM depuis 1982

Après une thèse de docteur ingénieur de l'École des mines de Paris qui traitait de la métallurgie des poudres des superalliages à base de nickel, soutenue en 1981, et un an chez Framatome, Michel commence une carrière d'enseignant-chercheur au Centre des Matériaux.

A cette époque, quelques collègues travaillaient déjà sur les traitements de surface mais sans liaison avec les traitements dits à haute énergie, comme les lasers ou le plasma. Cependant la demande industrielle concernant ces nouveaux procédés s'intensifie.

### Un équipement unique au monde

Pour y répondre, les chercheurs du Centre apporteront leurs compétences matériaux et travailleront avec de nombreux partenaires disposant de lasers. Mais les limitations technologiques imposées par les lasers incitent Michel et ses collègues à se tourner vers la projection plasma. C'est ainsi qu'en 1993, le Centre des Matériaux acquiert un équipement de projection plasma. Il est unique au monde encore à ce jour car polyvalent : il utilise tous les procédés de projection, sous différentes pressions et différentes atmosphères, et peut permettre de revêtir des échantillons de quelques millimètres comme de grosses pièces, des arbres de moteurs de sous-marins par exemple.



Ensemble de projection thermique sous atmosphère contrôlée CAPS du Centre de Compétence en Procédés de Projection.

(a) Vue d'ensemble de l'enceinte du CAPS;

(b) système de projection dynamique à froid cold spray de marque CGT installé dans le CAPS;

(c) torche plasma en cours de projection;

(d) détail de la buse de cold spray

## *Michel JEANDIN, expert en revêtements*

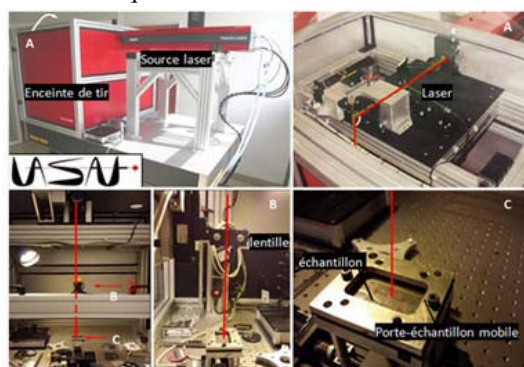
Cet équipement a permis à Michel JEANDIN et son équipe de mettre au point des procédés sur mesure pour les industriels qui n'investissent alors que sur un créneau technique spécifique donc moins coûteux.

### **Des systèmes matériaux mieux maîtrisés**

Mais le cœur de métier de Michel se situe bien dans le système matériau, c'est à dire l'ensemble revêtement-substrat-éventuel\_intermédiaire (une sous-couche par exemple), et donc par conséquent, les interfaces. L'approche reste matériaux au travers des poudres qui subissent du chauffage, de la solidification rapide et des chocs, le procédé n'étant en fait que la source d'énergie primaire. Les propriétés obtenues par ces techniques sont améliorées de façon significative et on allait même à l'époque de leur essor, jusqu'à parler mais très improprement, de « nouvelle métallurgie ».

### **Développement d'une nouvelle technique de mesure de l'adhérence**

Le savoir-faire des chercheurs se décline aussi sur des techniques au départ plus classiques. Ainsi, le frittage utilisé en métallurgie des poudres présente plusieurs avantages ; gain de matière car la pièce finale est obtenue directement, ou presque, propriétés améliorées grâce à la finesse des poudres densifiées. Mais l'intérêt de techniques de type frittage reste limité du fait en particulier de l'évolution des grains pendant le chauffage. En effet ceux-ci croissent ce qui va à l'encontre du but recherché. Pour pallier ces inconvénients, des techniques utilisant des explosifs ont bien permis de travailler en compaction dynamique, mais ces opérations étaient réservées au champ militaire. Depuis, une technique innovante, au potentiel comparable, le cold spray, a vu le jour. L'énergie, principalement cinétique, est apportée par un flux gazeux, créant un chargement mécanique qui propulse la poudre à très grande vitesse et assure ainsi la compaction. Pour utiliser cette technique innovante le Centre des Matériaux s'est équipé en 2006 d'une installation Cold Spray. Lors d'essais sur des matériaux revêtus, les chercheurs du Centre ont mis en évidence qu'une onde de choc pouvait créer une fissure entre le matériau et le revêtement. Ils ont alors développé un essai dit LASAT® permettant de mesurer l'adhérence d'un revêtement, à différentes températures y compris en milieu liquide.



### **Multiples partenariats à la clef**

Toutes ces étapes ont donné lieu à de nombreux partenariats (ENSMA/Poitiers, Arts et Métiers ParisTech), brevets et applications industrielles. Citons d'abord les industriels pionniers : Dassault aviation, Schneider électrique, Mallard SA. S'y ajoutent maintenant de nombreux autres partenaires, tels EdF, Renault, Schlumberger, ENEL en Italie, le Joint Research Center européen, l'INSA de Lyon, l'Université de Tohoku au Japon, le CERN avec lequel, d'ailleurs, un accord général de coopération avec l'École des mines de Paris est à la signature. Ce dernier cas illustre combien la coopération avec le Centre des Matériaux a convaincu le CERN, puisqu'il étend son partenariat à toutes les activités de recherche portées par l'École des mines de Paris.

### **Et demain ?**

Les procédés que nous venons d'évoquer sont donc maintenant suffisamment mûrs pour que la simulation numérique offre de nouvelles perspectives exploratoires et prédictives dans ce domaine. Le centre des matériaux a développé depuis 30 ans une suite logicielle Z-set dont la bibliothèque des comportements matériaux permet la simulation de procédés. Un poste devrait s'ouvrir bientôt pour recruter un jeune scientifique et donner un élan à cette voie dans le domaine de la modélisation des procédés.

L'autre voie à privilégier est celle permettant d'aller plus loin dans le domaine du transfert de technologie vers le milieu industriel. Elle passe par de nouvelles collaborations, tant au sein de l'École qu'avec des partenaires externes.



Contact : [michel.jeandin@mines-paristech.fr](mailto:michel.jeandin@mines-paristech.fr)



## *Les polymères en mécanique coopération franco-allemande*

La conférence Advanced Computational Engineering and Experimenting ACE-X-2016 a eu lieu à Split en Croatie, du 3 au 6 juillet 2016.

Cette série de conférence a pour ambition tous les ans de dresser un état de l'art et recenser les perspectives dans l'expérimentation et la modélisation des matériaux et des structures.

268 participants provenant de 37 pays différents ont contribué aux 13 sessions ouvertes : 15 % de Corée, 14 % de Taiwan, 10 % d'Allemagne, 8 % de France, et 6 % de Croatie. Les 47 autres pourcents proviennent d'autres pays dont USA, UK, Brésil, Australie, Nouvelle Zélande ...



*Assistance pendant la séance plénière du Professeur J.N. Reddy Texas A&M University (source ACEX2016)*

Les français sont venus essentiellement pour la plus grosse session SS7, « Experimental investigations and modelling in polymer mechanics: state of the art and future trends », dédiée à l'étude des polymères et composites.



Cette session, co-organisée par Lucien LAIARINANDRASANA, du Centre des Matériaux de MINES ParisTech, avec le Dr. Michael JOHLITZ (Universität der Bundeswehr München, Germany) et le Professeur Yann MARCO (ENSTA Bretagne, France) est le fruit d'une collaboration forte entre l'Allemagne et la France.

La participation française provient d'établissements incontournables dans le domaine, tels que l'Ecole Centrale de Nantes, l'institut Prime de l'ENSMA Poitiers, l'UTC, le CNRS Lyon qui ont donc répondu aux appels lancés initialement par le CdM et l'ENSTA Bretagne.

Des collaborations entre laboratoires français et franco-allemands ont été tissées à cette occasion.

De plus, la délégation française présente a décidé de ré-éditer et d'étendre leur participation en 2017 où l'ACE-X-2017 aura lieu à Vienne (Autriche) du 3 au 6 juillet. Prenez date!

Site de la conférence: <http://www.acex-conference.com/>

contact : [lucien.laiarinandrasana@mines-paristech.fr](mailto:lucien.laiarinandrasana@mines-paristech.fr)

## *Séminaire synchrotron et tomographie*

Le Centre des Matériaux est le lieu de séminaires présentant l'avancée des travaux de recherche menés au Centre, en partenariat avec les industriels concernés, ainsi que de séminaires exceptionnels donnés par nos visiteurs. Ces séminaires ont lieu à Evry.



Il vous est possible d'être abonnés à la liste de diffusion des séminaires afin de recevoir à l'avance les programmes. Ces séminaires sont gratuits. (Vous munir d'une pièce d'identité). Contactez [semteam@mat.mines-paristech.fr](mailto:semteam@mat.mines-paristech.fr).

Le mercredi 15 juin 2016 a eu lieu un séminaire intitulé « **Rayonnement synchrotron et tomographie appliqués en science des matériaux** » durant lequel les présentations suivantes ont été faites :

- Introduction, Henry PROUDHON – Responsable scientifique au Centre des Matériaux
- Rôle, capacités et maintenance de la tomographie RX, Nicolas COCHENNEC – Ingénieur - Safran
- Développement d'une machine de traction in-situ en tomographie : application aux polymères et composites, François RASSELET - Doctorant au Centre des Matériaux et Safran.
- PSICHE : A synchrotron tomography beam line for materials science, Andrew KING - Synchrotron SOLEIL
- Etude tridimensionnelle des premiers stades de la plasticité dans un polycristal par couplage 3DXRD et CPFEM, Nicolas GUENINCHAULT – Doctorant au Centre des Matériaux.

Les résumés des présentations sont disponibles ICI ([http://www.mat.mines-paristech/Actualites/Les\\_seminaires](http://www.mat.mines-paristech/Actualites/Les_seminaires))

## Trois chercheurs du CDM au 3D Materials Science 2016

Le Centre des Matériaux a eu une présence marquée à la conférence 3DMS (3D Material Science) qui s'est tenue du 10 au 13 juillet 2016 à St Charles, Illinois, USA.

Nicolas GUENINCHAULT, Yazid MADI et Henry PROUDHON ont présenté leurs travaux:

- On the Origin of the Anisotropic Damage of X100 Line Pipe Steel using 3D in Situ synchrotron-Radiation Tomography Investigation, par Yazid Madi; Juan Garcia; Thilo Morgeneuer; Henry Proudnon; Jacques Besson

- Non Destructive Nanotomography Imaging in Structural Materials: par Henry Proudnon; Thilo Morgeneuer; Erembert Nizery; Lucien Laiarinandrasana; Peter Cloetens

- Early Stage of Plastic Deformation in Metals Studied by In Situ X-Ray Synchrotron Topotomography and Crystal Plasticity FEM Simulations par Nicolas Gueninchaault; Henry Proudnon; Wolfgang Ludwig; Samuel Forest

Henry PROUDHON faisait partie du comité d'organisation de cette édition.



Reconstruction 3D par tomographie en contraste de diffraction de la microstructure polycristalline d'un échantillon d'aluminium-lithium (0,5 mm x 0,5 mm x 1,2 mm).

Contact : [henry.proudnon@mines-paristech.fr](mailto:henry.proudnon@mines-paristech.fr)

## Thèse soutenue



Jacqueline Caballero a préparé sa thèse de doctorat dans l'équipe Métallurgie Mécanique du Centre des Matériaux. Elle a été encadrée par Jérôme CREPIN et Cécile DUHAMEL.

Elle a soutenu sa thèse intitulée "*Modélisation de l'amorçage de la Corrosion sous Contrainte en milieu primaire de l'alliage 600*" le 1er juillet 2016

Résumé :

Plusieurs composants présents dans les réacteurs à eau sous pression (REP) ont été fabriqués en alliage 600, un alliage base nickel contenant environ 16% de chrome. Le retour d'expérience, comme les études de laboratoire, montrent une sensibilité à la corrosion sous contrainte (CSC) de cet alliage en milieu primaire.

Des études antérieures ont permis de développer un modèle d'amorçage basé sur une approche macroscopique et dépendant de différents paramètres tels que : la température, la contrainte et la microstructure du matériau. Cependant, ce modèle manque de robustesse car l'effet de la teneur en hydrogène dissous et l'effet de l'histoire de chargement mécanique ne sont pas considérés et les effets microstructuraux ne le sont que partiellement.

Ces travaux de thèse ont comme objectif principal de développer un modèle local prévoyant le temps d'amorçage des fissures de CSC en fonction de paramètres locaux liés à la microstructure du matériau (précipitation intergranulaire), à l'environnement (température, et teneur en hydrogène dissous) et aux contraintes locales aux joints des grains. Cette étude comprend donc la caractérisation des matériaux (analyse chimique, microstructure et comportement mécanique) et la réalisation des essais d'oxydation et de corrosion sous contrainte, ainsi que leur interprétation. Le modèle local développé est basé sur des grandeurs physiques et enchaîne les différentes étapes de CSC à savoir l'incubation, l'amorçage et la propagation des fissures.

Pour construire ce modèle, nous avons considéré la formation de pénétrations d'oxyde aux joints de grains comme une étape-clé dans l'amorçage des fissures de CSC. Pour cela, une cinétique d'oxydation intergranulaire pour l'alliage 600 a été identifiée. De plus, un critère d'amorçage des fissures de CSC a été déterminé en couplant contrainte locale et profondeur d'oxydation intergranulaire critique. Enfin, l'étape de propagation des fissures a été modélisée à partir d'une base de données rassemblant les profondeurs de fissure atteintes en fonction du temps d'essai pour différentes conditions expérimentales.

contact : [cecile.duhamel@mines-paristech.fr](mailto:cecile.duhamel@mines-paristech.fr)

## Le kiosque de l'été

Parutions des chercheurs du centre des matériaux pour la période mai-août 2016



### Revue à comités de lecture

FOREST Samuel, Non linear regularization operators as derived from the micromorphic approach to gradient elasticity, viscoplasticity and damage, Proceedings of the royal society A, 2016,472, 20150755, 27 p.

RYCKELYNCK David, MISSOUM BENZIANE Djamel, Hyper-reduction framework for model calibration in plasticity-induced fatigue, Advanced modeling and simulation in engineering sciences, 2016, 3, article 15, 16 p.

KRAJCARZ Florent, GOURGUES-LORENZON Anne Françoise, LUCAS E., Influence of carbon content on the primary solidification mode of high strength steels in resistance spot welding conditions, Scripta materialia, 2016, 120, p. 98-102

HAMMICHE BELLAL Y., DJADOUN A., MEDDOUR BOUKHOBZA L., BENADDA A., AUROUX A., BERGER Marie Hélène, MERNACHE F., Effect of the preparation method on the structural and catalytic properties of spinel cobalt-iron oxide, Materials chemistry and physics, 2016, 177, p. 384-397

THIONNET Alain, BUNSELL Anthony, Fibre break failure processes in unidirectional composites : evaluation of critical damage states, Philosophical transactions of the royal society A, 2016, 374, 20150270, 14 p.

BARGOUGUI R., PICHAVANT Alexandre, HOCHÉPIED Jean François, BERGER Marie Hélène, GADRI A., AMMAR S., Synthesis and characterization of SnO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> and

TiO<sub>2</sub>SnO<sub>2</sub> nanoparticles as efficient materials for photocatalytic activity, Optical materials, 2016, 58, p. 253-259

TKALICH D., FOURMEAU M., KANE A., LI C.C., CAILLETAUD Georges, Experimental and numerical study of Kuru granite under confined compression and indentation, International journal of rock mechanics & mining sciences, 2016, 87, p. 55-68

VAISSIERE N., SAADA S., LEE K.H., MERMOUX M., SENNOUR Mohamed, ARNAULT J.C., Porous diamond foam with nanometric diamond grains using Bias Enhanced Nucleation on iridium, Diamond & related materials, 2016, 68, p. 23-27

PROUDHON Henry, LI Jia, REISCHIG P., GUENINCHAULT Nicolas, FOREST Samuel, LUDWIG W., Coupling diffraction contrast tomography with the finite element method, Advanced engineering materials, 2016, 18, p. 903-912

ZAID Hicham, BERGER Marie-Hélène, JALABERT D., WALLS M., AKROBETU R., FONGKAEW I., LAMBRECHT W.R.L., GOBLE N.J., GAO X.P.A., BERGER P., SEHIRLIOGLU A., Atomic resolved depth profile of strain and cation intermixing around LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> interfaces, Scientific reports, 2016, 6, 28118, 13 p.

MAKTOUF W., AMMAR Kais, BEN NACEUR I., SAI K., Multiaxial high-cycle fatigue criteria and life prediction : application to gas turbine blade, International journal of fatigue, 2016, 92, p. 25-35

LING Chao, BESSON Jacques, FOREST Samuel, TANGUY B., LATOURTE F., BOSSO E., An elastoviscoplastic model for porous single crystals at finite strains and its assessment based on unit cell simulations, International journal of plasticity, 2016, 84, p. 58-87

ABECASSIS Manon, KOSTER Alain, MAUREL Vincent, Short and long crack growth behavior of welded ferritic stainless steel, Procedia structural integrity, 2016, 2, p. 3515-3522

REN Sicong, ROUSSELIER Gilles, MORGENEYER Thilo, MAZIERE Matthieu, FOREST Samuel, Numerical investigation of dynamic strain ageing and slant ductile fracture in a notched specimen and comparison with synchrotron tomography 3D-DVC, Procedia structural integrity, 2016, 2, p. 3385-3392



## Le kiosque de l'été (fin)

MATAVELI SUAVE L., CORMIER J., VILLECHAISE P., BERTHEAU D., BENOIT G., CAILLETAUD Georges, MARCIN L., Anisotropy in creep properties of DS200Hf alloy, Materials at high temperatures, 2016, 33, p. 361-371

MAUREL Vincent, ESIN Vladimir, SALLOT P., GASLAIN Fabrice, GAILLIEGUE Sylvain, REMY Luc, Rumpling of nickel aluminide coatings : a reassessment of respective influence of thermal grown oxide and phase transformations, Materials at high temperatures, 2016, 33, p. 318-324

LAIARINANDRASANA Lucien, KLINKOVA O., NGUYEN Franck, PROUDHON Henry, MORGENEYER Thilo, LUDWIG W., Three dimensional quantification of anisotropic void evolution in deformed semi-crystalline polyamide 6, International journal of plasticity, 2016, 83, p. 19-36

THIONNET Alain, TRABELSI Wassim, ROIRAND Quentin, BUNSELL Anthony, LAIARINANDRASANA Lucien, Modelling of failure of woven composites, part 1 : nomenclature defining the interzone concept, Applied composite materials, 2016, 23, p. 659-679

LAIARINANDRASANA Lucien, TRABELSI Wassim, ROIRAND Quentin, BUNSELL Anthony, THIONNET Alain, Modelling of failure of woven composites, part 2 : experimental and numerical justification of the interzone concept, Applied composite materials, 2016, 23, p. 681-705

THIONNET Alain, BUNSELL Anthony, CHOU Heng Yi, Intrinsic mechanisms limiting the use of carbon fiber composite pressure vessels, Journal of pressure vessel technology, 2016, 138, 060910, 5 p.

IAKOVLEVA A., CHESNAUD Anthony, ANIMITSA I., DEZANNEAU G., Insight into the synthesis and electrical properties of alkali-earth-substituted Gd<sub>3</sub>GaO<sub>6</sub> oxide ion and proton conductors, International journal of hydrogen energy, 2016, 41, p. 14941-14951

BULJAC A., TAILLANDIER-THOMAS T., MORGENEYER Thilo F., HELFEN L., ROUX S., HILD F., Slant strained band development during flat to slant crack transition in AA2198T8 sheet : in situ 3D measurements, International journal of fracture, 2016, 200, p. 49-62

MARCHENKO Arina, MAZIERE Matthieu, FOREST Samuel, STRUDEL Jean Loup, Crystal plasticity simulation of strain aging phenomena in  $\alpha$ -titanium at room temperature, International journal of plasticity, 2016, 85, p. 1-33

### Articles

PATAMAPROHM Baramee, PHONGPHINITANA Ekkarin, GUINAULT C., GANTCHENKO Vladimir, RENARD Jacques, JEANDRAU J.P., PEYRAC Catherine, LEFEBVRE Fabien, Study of adhesive joints under static and fatigue loading, Revue des composites et des matériaux avancés, 2016, p. 63-85

NIMDUM Pongsak, RENARD Jacques, Experimental analysis and modelling of fatigue behaviour of thick woven laminated composites, Revue des composites et des matériaux avancés, 2016, p. 87-113

### Editeur d'ouvrage

Generalized continua as models for classical and advanced materials, ed. Holm Altenbach, Samuel Forest, Springer, 2016

### Actes de congrès

MOREAU David, CORTE Laurent, BORIT François, GUIPONT Vincent, Cold spray of agglomerated submicronic hydroxyapatite powders for biomedical applications, in : ITSC 2016, International thermal spray conference, 10-12 mai 2016, Shanghai, DVS 324, 6 p.

LEGER Pierre Emmanuel, BORIT François, FABREGUE Nicole, JEANDIN Michel, Influence of powder characteristics on the microstructure and bond strength of cold-sprayed aluminum coating, in : ITSC 2016, International thermal spray conference, 10-12 mai 2016, Shanghai, DVS 324, 6 p.

BORTOLUSSI Vincent, BORIT François, CHESNAUD Anthony, JEANDIN Michel, FAESSEL M., FIGLIUZZI B., WILLOT F., ROCHE K., SURDON G., Cold spray of metal-polymer composite coatings onto carbon fiber-reinforced polymer (CFRP), in : ITSC 2016, International thermal spray conference, 10-12 mai 2016, Shanghai, DVS 324, 7 p.

contact : [odile.adam@mines-paristech.fr](mailto:odile.adam@mines-paristech.fr)

## Présentations des doctorants de 1ère année

En fin de première année de thèse, les doctorants inscrits à l'école doctorale SMI 432, dans les spécialités « Sciences et Génie des Matériaux » et « Mécanique » proposées au Centre des matériaux, défendent leurs travaux et présentent leur plan de thèse pour les deux années suivantes devant un jury qui inclut des industriels. Cette année, le jury était composé de Alain Denoirjean (Université de Limoges), Salima Bouvier (UTC), Rafael Estevez (Grenoble INP), Bernard Marini (CEA), Arjen Roos (SafranTech), Jean-François Agassant (Cemef Mines ParisTech), Jean-François Deü (CNAM), Julien Haccoun (Direction de la Recherche, Mines ParisTech) et pour le Centre des Matériaux : Jérôme Crépin, Vincent Maurel, Marie-Hélène Berger.

Cette soutenance n'est pas qu'une simple formalité, elle permet de vérifier que la thèse commence dans de bonnes conditions matérielles, que le sujet est abordé sous le bon angle, et que le doctorant a les moyens de conduire son projet. Le jury peut émettre des suggestions pour aider le doctorant. Si la thèse a démarré en décalé, la soutenance se fait en septembre.

Vous trouverez ci-dessous les résumés des présentations faites par les doctorants inscrits en thèse en octobre 2015.

Ces présentations vous donneront un aperçu des sujets qui commencent au Centre des Matériaux. Il vous est possible d'accéder aux résumés des trois dernières années sur notre site

(<http://www.mat.mines-paristech.fr/Formation/Etudes-doctorales/Exposes-des-1eres-annees/>),



**AKULA Basava Raju**  
**Développement de méthodes numériques  
 en mécanique du contact en vue  
 d'applications aérospatiales**

Directeur de thèse : Georges CAILLETAUD

Maître de thèse : Vladislav YASTREBOV

Partenaire : SAFRAN

contact : [georges.cailletaud@mines-paristech.fr](mailto:georges.cailletaud@mines-paristech.fr)

Recent developments in the finite element software Z-set allows to solve efficiently most contact problems. However, the implemented methods make use of a specific contact discretization that lacks accuracy in load transfer between contacting surfaces. In consequence

— the contact patch test for non-conforming meshes cannot be passed

— locally the contact tractions may experience spurious oscillations

— elements with higher order interpolations require specific treatment

These problems are associated with the under-interpolation of contact tractions and non-satisfaction of Ladyzhenskaya-Babuska-Brezzi (LBB) [1] condition. The “surface-to-surface” class of contact discretizations, based on the weak fulfillment of contact constraints, allows to avoid the aforementioned drawbacks and to treat contact problems with higher accuracy and improved robustness.

The thesis objectives are

— Implement a robust, multipurpose and accurate numerical method (mortar methods) to treat contact problems on a parallel architecture

— Improve robustness and efficiency of the contact detection and resolution phases

This thesis has an ambition to make a step forward in efficiency and robustness of numerical methods for contact treatment with arbitrary material models within the implicit

finite element method on parallel computer architectures. At the same time the thesis will contribute to advancement of the finite element software Z-set and to the resolution of several important frictional contact problems encountered in aeronautical industry coming from Safran, the industrial partner of this project

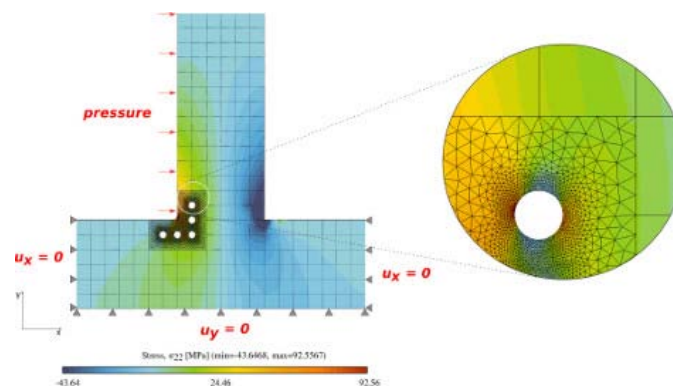


Illustration of tying for non-conformal mesh interfaces



**AL KOTOB Moubine**  
**Compétition entre localisation, instabilité  
 et rupture ductile lors de la ruine de  
 structures aéronautiques**

Prediction of loss of uniqueness in elastic-plastic solids for various finite deformation formulations

Directeur de thèse : Samuel FOREST

Maître de thèse : Matthieu MAZIERE

Partenaire industriel : Safran

Contact : [samuel.forest@mines-paristech.fr](mailto:samuel.forest@mines-paristech.fr)

It is well known that the loss of uniqueness in elastic solids is intimately linked to a loss of stability of the fundamental solution. The appearance of such responses is usually considered as a loss of reliability of the structure. For elastic-plastic solids, this hypothesis is even more applicable when

## Présentations des doctorants de 1ère année

considering strain localization problems[1]. These modes imply finite changes in the geometry that cannot be disregarded. This requires the definition of a finite deformation formulation, for which a multiplicity of constitutive laws can be found in the literature [2] [3] [4].

Hill's uniqueness criterion, defined in 1958, seems to be a key element for the prediction of bifurcated modes [5]. Using a hypo-elasto-plastic constitutive law, the uniqueness of the solution in terms of velocity is discussed based on an incremental formulation of a rate boundary value problem. Multiple bifurcation analyses were developed on the basis of this criterion, and the different possible branches were searched through the resolution of eigenvalue problems. This method is applied in [6] to analyze the competition between necking and buckling during a hydro-forming process.

In fact, the competition between multiple failure modes can be observed in many different structures. For example, metal tubes subject to torsion loading could present either localized strain bands, or complex buckling modes depending on their thickness, diameter and length. In order to optimize the mass/geometry of a structure, as it is especially of interest in the aeronautical field, one needs to be able to predict and characterize complex failure modes.

The bifurcation analysis is developed on a re-actualized tangent operator that strongly depends on the choice of the constitutive law and the current stress distribution. Thus, also considering hyper-elasto-plastic constitutive laws that were not discussed in [5], it is proposed to formulate the tangent operator and evaluate both analytically and numerically the critical load predicted for simple boundary value problems. Simple tension results are then compared with Considère's criteria [8], and hydro-forming-like boundary conditions with [6].

### References

- [1] J. R. Rice. The localization of plastic deformation. *Theoretical and Applied Mechanics*, 1:207220, 1976.
- [2] J. Besson, G. Cailletaud, J.-L. Chaboche, and S. Forest. *Non-linear mechanics of materials*. Springer, 2010.
- [3] J. Mandel. *Plasticité classique et viscoplasticité*. CISM, 1971.
- [4] Q. S. Nguyen. *Stability and nonlinear solid mechanics*. Hermes, 2000.
- [5] R. Hill. A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 6:236249, 1958.
- [6] G. Nefussi and A. Combescure. Coupled buckling and plastic instability for tube hydroforming. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44:899914, 2002.
- [7] L. H. N. Lee and C. S. Ades. Plastic torsional buckling strength of cylinders including effects of imperfections. *Journal Of The Aeronautical Sciences*, 24:241248, 1957.
- [8] A. Considère. Mémoire sur l'emploi du fer et de l'acier dans les constructions. *Annales des Ponts et Chaussées*, 9:574, 1885.



**BACH Anne-Cécile**

**Etude du piégeage de l'hydrogène dans les aciers inoxydables austénitiques dans le cadre de la corrosion sous contrainte assistée par l'irradiation**

*Directeur de thèse : Jérôme CREPIN*

*Maître de thèse : C. DUHAMEL, S. PERRIN (CEA)*

*Partenaire industriel : CEA*

*contact : jerome.crepin@mines-paristech.fr*

Dans le cœur des réacteurs à eau pressurisée (REP), les internes de cuve en acier inoxydable sont en contact avec le milieu primaire, milieu aqueux à haute pression et température élevée, et peuvent comporter des contraintes résiduelles dues à leur mise en forme et/ou à leur assemblage. De plus, leur proximité avec le combustible implique qu'ils sont soumis à l'irradiation aux neutrons. L'ensemble de ces facteurs combinés peut entraîner un endommagement prématuré des pièces lié au phénomène de corrosion sous contrainte assistée par l'irradiation (Irradiation-Assisted Stress Corrosion Cracking).

Le milieu primaire est riche en hydrogène provenant d'une part de l'eau et d'autre part de l'hydrogène dissous ajouté au milieu. Il a déjà été montré qu'au cours de l'oxydation d'un acier inoxydable dans un milieu primaire simulé, de l'hydrogène pénètre dans le matériau et s'accumule sous l'interface oxyde/alliage. Cette accumulation pourrait principalement être le fait du piégeage de l'hydrogène par des lacunes de fer créées à l'interface oxyde/métal lors du processus d'oxydation. Ces lacunes constituent un type de site de piégeage de l'hydrogène parmi ceux potentiellement présents dans ces alliages, issus à la fois de la plasticité du matériau et de l'irradiation neutronique. En effet en réacteur, les neutrons entrent en collision avec les atomes du réseau métallique ce qui engendre la formation de défauts dans l'alliage tels que des lacunes, des interstitiels, des cavités, des bulles d'hélium ou des boucles de dislocations qui peuvent être des sites préférentiels de piégeage pour l'hydrogène. L'accumulation locale de cet élément peut conduire, via différents mécanismes, à un affaiblissement des propriétés mécaniques locales du matériau menant à son endommagement prématuré. Ainsi, les phénomènes de piégeage de l'hydrogène au niveau des défauts induits par l'irradiation peuvent être un facteur majeur dans le processus d'IASCC.

L'objectif de cette thèse est d'identifier, caractériser et comprendre les interactions entre l'hydrogène et les défauts induits par l'irradiation dans un acier inoxydable 316L. Pour cela, un matériau modèle « sans défaut » et des matériaux modèles présentant des défauts (implantation ionique, écrouissage) sont élaborés et étudiés. Les différents défauts sont caractérisés par microscopie électronique en transmission



## Présentations des doctorants de 1ère année

(MET). Pour chaque matériau modèle élaboré, deux types de chargement en deutérium, qui est un isotope de l'hydrogène, sont réalisés : une approche modèle par chargement cathodique, et une approche plus représentative par corrosion en milieu primaire. Les interactions hydrogène-défauts sont ensuite étudiées finement en association avec un modèle numérique de diffusion-piégeage.



**BRIEZ Louise**  
**Lois de comportement et microstructure en fonction de la température d'alliages d'aluminium pour application aéronautique**

Directeur de thèse : Jérôme CREPIN

Maitre de thèse : Vladimir ESIN

Partenaire industriel : Dassault Aviation

contact : jerome.crepin@mines-paristech.fr

Les alliages d'aluminium constituent environ 80 % des structures d'avions d'affaire Dassault. Ils sont choisis pour leur bonne tenue mécanique spécifique (rapportée leur densité) et pour leur coût. Cependant, ils sont spécifiés pour des applications limitées à la plage de température entre -55 et 85 °C. En dehors de cette plage, d'autres alliages sont privilégiés mais sont bien souvent plus onéreux en termes de masse et de coût.

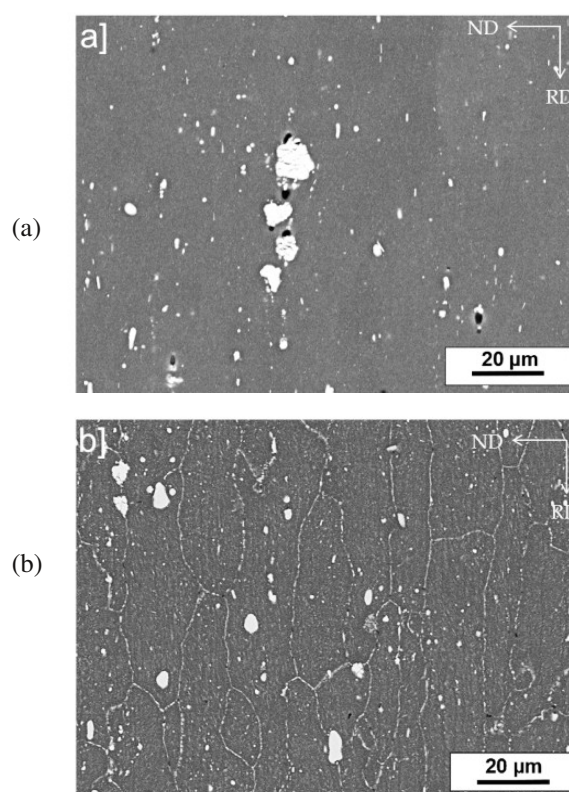
La problématique de Dassault Aviation concerne l'emploi des alliages d'aluminium au-delà de 85 °C. En effet, des retours de cas en service démontrent que des pièces sont parfois exposées à des températures plus élevées que 85 °C (surchauffe à l'usinage, incendie, tuyau percé, dégivrage, etc.). Par ailleurs, Dassault Aviation souhaite alimenter sa base de données matériaux et éventuellement établir des justifications d'emploi de leurs aluminiums au-delà de 85 °C.

L'objectif de cette thèse est donc de déterminer l'évolution microstructurale des alliages d'aluminium en fonction des facteurs temps/température/contrainte et de coupler ces observations à l'établissement des lois de comportement de ces alliages.

Pour cela deux nuances ont été sélectionnées : le 2024 aux états T3 et T8 et le 5086 à l'état H111. Ces deux alliages ont été sélectionnés car ils sont respectivement avec et sans durcissement structural, à savoir que les alliages à durcissement structural ont des propriétés inhérentes à l'état de la précipitation et donc dépendantes du traitement thermique. Il sera donc intéressant de comparer l'effet de la température sur ces deux types d'alliage. Ces nuances seront testées à différentes températures, avec ou sans vieillissement artificiel, et les résultats seront corrélés à l'évolution de microstructure afin d'appréhender les évolutions potentielles d'une pièce de structure aéronautique tout au long de sa durée de vie. Une investigation bibliographique permettra d'étayer

et comprendre les mécanismes d'endommagement mis en jeu ainsi que leur impact.

La finalité est de modéliser une cartographie complète microstructure/propriétés en fonction des facteurs temps/température/contrainte qui permettra, in fine, d'évaluer l'état de l'alliage en fonction de son emploi, volontaire ou non, suivant ces différents paramètres. Enfin, un couplage avec des méthodes de contrôle non destructif sera établi afin que ces méthodes permettent de remonter à un scénario d'endommagement dans le cas de pièces surexposées en température.



Images MEB (QBSD) du 2024 T3 à l'état brut (a) et vieilli 1000 h à 250 °C (b) illustrant l'impact de l'exposition en température sur la microstructure de l'alliage.

## SPrésentations des doctorants de 1ère année



**BUNEL Margaux**  
**Fabrication additive par projection thermique par gaz froid « cold spray »**  
*Directeur de thèse : M. JEANDIN*

*Partenaires industriel: Dassault Aviation, Mallard, CEA*

*contact : michel.jeandin@mines-paristech.fr*

Le procédé de projection dynamique par gaz froid, plus couramment appelé « cold spray », fait partie de la famille des projections thermiques. Il doit son nom aux faibles températures utilisées qui permettent aux particules de rester à l'état solide tout au long du procédé, contrairement aux autres techniques de projection.

Le principe du « Cold spray » est de chauffer et de comprimer un gaz, généralement neutre comme l'azote afin que celui-ci entraîne la poudre vers une buse, qui permet d'accélérer les particules jusqu'à atteindre des vitesses supersoniques comprises entre 300 et 1200 m.s<sup>-1</sup>. Le revêtement se construit grâce à la déformation plastique des particules projetées.

Le procédé « Cold spray » dépend de nombreux paramètres, comme l'angle ou la distance de projection, mais le paramètre essentiel de ce procédé est la vitesse des particules. En effet, pour que la particule adhère au substrat, sa vitesse doit être comprise entre une certaine vitesse dite critique et la vitesse d'érosion du substrat. Si la vitesse de la particule est inférieure à la vitesse critique, la particule rebondit. Dans le cas où la vitesse de la particule est supérieure à la vitesse d'érosion, la particule creuse et érode le substrat et n'adhère pas.



*Dépôt d'aluminium 2024 sur un substrat d'aluminium 2024 T3 réalisé par "cold spray"*

Les dépôts obtenus grâce à ce procédé présentent de bonnes propriétés. Les faibles températures limitent la présence d'oxyde dans le revêtement et empêche la fusion des particules limitant ainsi les contraintes résiduelles en traction. De plus le dépôt est très dense, le taux de porosité est

inférieur à quelques pourcent, et peut être très épais. Ce qui permet d'envisager d'utiliser le « Cold spray » pour la fabrication additive.

Actuellement des pièces de géométrie simples ont été réalisées à partir de ce procédé mais les caractéristiques mécaniques de ces pièces sont encore peu connues.

La plus grande partie des modélisations « Cold spray » sont des simulations de splats, c'est à dire une particule s'écrasant sur un substrat. Peu de publications traitent de la modélisation d'un grand nombre de particules projetées. Un modèle d'empilement des particules permettant de simuler un nombre important d'impact de particule est en cours de développement.

Les objectifs de cette thèse sont de comprendre comment s'empilent les particules afin d'obtenir les géométries souhaitées grâce au modèle d'empilement des particules. Les dépôts réalisés sur les différentes installations seront caractérisés afin de connaître leurs propriétés.



**CHAIEB Ahmed**  
**Comportement anisotherme et rupture des gaines combustibles en alliage de Zirconium : Application à la situation d'accident de réactivité (RIA)**

*Directeur de thèse : Jérôme CREPIN*  
*Maitre de thèse : Alain KÖSTER*  
*Partenaire industriel : EDF R&D*

*contact : jerome.crepin@mines-paristech.fr*

Cette thèse s'inscrit dans le contexte des études de sûreté sur le comportement du matériau de gainage employé actuellement dans le parc nucléaire français.

Le RIA (Reactivity Initiated Accident) est un scénario accidentel hypothétique dimensionnant pour les cœurs des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP). Lors de cet accident, la gaine combustible en alliage de zirconium, contenant la matière fissile, est soumise à un transitoire thermomécanique rapide pouvant potentiellement mener à sa rupture. Il s'agit d'un transitoire rapide (quelques ms) durant lequel la gaine est simultanément soumise à une rampe de température pouvant atteindre jusqu'à 1000°C.s<sup>-1</sup> et une rampe de déformation pouvant atteindre jusqu'à 5.s<sup>-1</sup>. Par ailleurs, le chargement en déformation imposée subi par la gaine est complexe avec un caractère biaxié évoluant au cours du transitoire.

L'objectif de ce travail de thèse, qui allie un volet expérimental et un volet numérique, consiste à étudier l'influence du transitoire thermo-mécanique sur le comportement mécanique et sur la rupture du Zircaloy-4 détendu.

Dans un premier temps il sera nécessaire de développer des dispositifs expérimentaux permettant de solliciter la gaine en conditions anisothermes et/ou sous une sollicitation biaxiée.

## Présentations des doctorants de 1ère année

Le second aspect du travail consiste à consolider les modèles mécaniques (loi de comportement et critère de rupture) isothermes des gaines en alliages de zirconium à partir de ces deux nouveaux essais anisothermes (uniaxié et biaxié) représentatifs des conditions RIA.



### CUSSET Raphaël

Directeur de thèse: Henry PROUDHON  
Maître de thèse : Farida AZZOUC, Marta DRAGON-LOUISET (Dassault)  
Partenaire industriel : Dassault

contact : henry.proudhon@mines-paristech.fr

Cette thèse se déroule en partenariat avec Dassault Aviation, qui est un des principaux constructeurs aéronautiques français d'avions militaires et commerciaux.

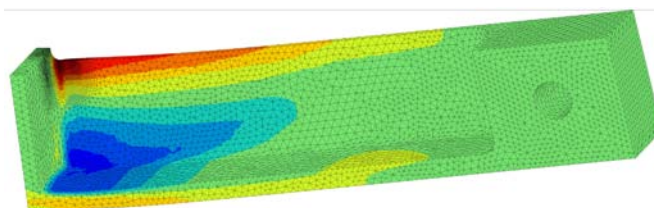
Certaines pièces structurelles comme les intrados de voilure et de plan central des avions civils en aluminium sont formées à froid par des procédés de pliages à l'aide de presses manuelles. Ces transformations se caractérisent par une plastification localisée importante. Cette dernière modifie les propriétés des matériaux, dont les caractéristiques significatives pour leur tenue ne correspondent pas localement à celles du matériau initial. Les niveaux et la distribution des déformations plastiques induites par le formage dépendent de la géométrie, du procédé (en particulier de l'histoire de la mise en forme) et du matériau.

Les autorités de certification ont longtemps accepté une justification expérimentale par la Cellule d'Essais Mécaniques (CEM) des pièces concernées au cas par cas, associée à un dossier de calcul fondé sur les propriétés des matériaux non formés. La tenue de la CEM couvre ainsi la tenue des pièces de série, pourvu que les procédés restent identiques.

Depuis les programmes Falcon 5X et 8X, les certificateurs demandent que les admissibles dans les dossiers soient cohérents avec les méthodes de fabrication. Par ailleurs, les usines qui cherchent la reproductibilité et les gains de productivité, demandent régulièrement à modifier ces procédés essentiellement manuels pour les automatiser et les simplifier au maximum, ce qui requiert une justification de non-régression sans nouvelle CEM. Aujourd'hui, faute de moyens de calcul suffisamment précis, de telles justifications passent par des campagnes d'essais importantes entraînant des coûts et délais non négligeables. Le développement d'outils de modélisation performants et de bases de données enrichies permettrait de répondre de manière plus efficace (réduction du nombre/coût d'essais) aussi bien aux certificateurs qu'aux usines.

Le but de cette thèse est donc de simuler l'amorçage et la propagation d'une fissure de fatigue dans une tôle raidie et

prédéformée en alliage Al2024T351. Il faut donc passer par plusieurs étapes, la caractérisation du comportement élastoplastique anisotrope du matériau, la simulation de la prédéformation de la tôle avec son raidisseur et finalement la prédiction de la propagation d'une fissure de fatigue en trois dimension dans cette pièce.



Etat des contraintes résiduelles au sein d'une portion d'intrados après opération de formage.



### DELCOURT Fabien

Textiles autodécontaminants via la synthèse in-situ de nanoparticules photocatalytiques  
Self-decontaminating textile via in-situ synthesis of photocatalytic nanoparticles

Directeur de thèse: Jean-François HOCHÉPIED  
Maître de thèse : CHATZISYMEON Thalia, University of Edinburgh, Edinburgh, United-Kingdom  
Partenaire industriel : DGA

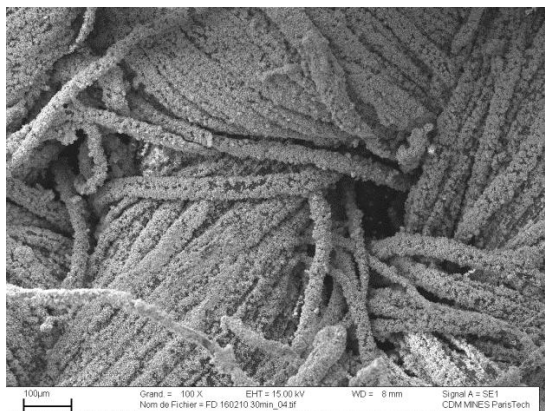
contact : jean-francois.hochepied@mines-paristech.fr

The functionalization of textiles by photocatalytic particles has been recently studied for the purpose of conferring self-cleaning and autodecontamination properties. Direct approaches consist in impregnating suspensions of nanoparticles (by soaking, spray, layer by layer...), which leads to processing issues in term of reproducibility or scale-up. In this thesis, an alternative is developed based on in-situ synthesis of photocatalytic nanoparticles on fabrics.

Our work relies principally on the thermal destabilization of zinc-ammonia complexes at moderate temperatures to form ZnO nanostructures. This method is simple and suitable with most textiles (like cotton) and can be adapted to an industrial process: solutions were prepared by dissolution of zinc precursors in ammonia solution, and then re-precipitated on the fibers through conventional heating and ammonia evaporation.



## Présentations des doctorants de 1ère année



SEM image of ZnO nanoparticles deposited on cotton fabrics

The idea is to grow a dense coating of nanorods on the fibers, which is expected to be the most favorable structure to the photocatalytic efficiency (better absorption of light and adsorption of pollutant). This step of in-situ synthesis is radically different from other methods based on pre-existing particle deposition. This method of coating is expected to allow an efficient regeneration when needed. Our strategies can support a short durability because it is simple and cheap to functionalize a raw fabric (or re-functionalize a fabric after performance loss). Thereby the choice turns to ZnO, it is less expensive than TiO<sub>2</sub> with similar photoactivity, and may be obtained in a well-crystallized state in soft conditions (near neutral pH and low temperature). In addition, ZnO is well-known to exhibit growth habit leading to rod-shaped particles, which may add other effects linked to nano-architecture and/or preferential exposed crystal faces. The main drawback of ZnO is its poor chemical stability especially in acidic conditions.

The French part will focus on in-situ synthesis and characterization of nanostructures: quality of coating depending on process parameters, resistance to washing, capacity of regeneration, whereas photocatalytic efficiency tests and durability will be realized with our Scottish partner, specialized in decontamination/depollution by photocatalytic processes



**FAUQUE Jules**

**Mise en place d'un modèle d'ordre réduit pour la simulation du comportement mécanique du combustible nucléaire**

Directeur de thèse: David RYCKELYNCK  
Partenaire industriel : CEA Cadarache

contact : david.ryckelynck@mines-paristech.fr

Cette thèse s'inscrit dans le cadre des études concernant le comportement des combustibles nucléaires de la filière Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) qui constituent l'essentiel des réacteurs du parc français.

Le logiciel ALCYONE, développé au sein de la plate-forme PLEIADES en collaboration avec EDF et AREVA, s'intéresse à la simulation d'un crayon combustible REP. Le schéma de calcul d'ALCYONE s'appuie sur un couplage multi-physique de point fixe entre les différents modèles (neutronique, thermique, mécanique, physico-chimie, ...) intervenant dans la simulation du comportement des combustibles REP. L'essentiel du temps CPU d'un calcul ALCYONE est consommé par la résolution mécanique non-linéaire effectuée via le solveur éléments finis Cast3m développé également au CEA.

Afin d'accélérer le temps de calcul d'ALCYONE, nous souhaitons étudier l'apport de méthodes de réduction de modèles pour la simulation du comportement mécanique du crayon combustible. La principale difficulté vient du problème de contact qui n'a que récemment été regardé en réduction de modèles. Nous proposons d'étendre la méthode d'hyper-réduction à des problèmes de contact.



**GODIN Hélène**

**Effet de la microstructure sur la ductilité à basse température des aciers inoxydables martensitiques emboutissables à chaud pour application automobile**

Directrice de thèse : Anne-Françoise GOURGUES

Maître de thèse : Jean-Denis MITHIEUX (Aperam)

Partenaire industriel : Aperam

contact anne-francoise.gourgues@mines-paristech.fr

L'industrie automobile cherche à alléger les voitures afin de diminuer leur consommation en carburant. Pour diminuer l'épaisseur des pièces, il est nécessaire d'augmenter leur résistance mécanique. L'un des procédés les plus utilisés à ce jour pour fabriquer des pièces très résistantes mécaniquement et à géométrie relativement complexe est l'emboutissage à chaud. L'acier est chauffé à haute température pour l'austénitiser puis l'emboutissage à chaud permet de mettre en forme et de tremper la pièce en une seule étape. La trempe se fait dans les outils de presse refroidis, ce qui permet d'obtenir une vitesse de refroidissement d'au moins 30°C/s. Ce procédé permet de produire des pièces en acier martensitique avec une résistance mécanique comprise entre 1000MPa et 2000MPa. Les aciers inoxydables martensitiques présentent de réels avantages par rapport aux aciers au carbone car ils sont auto-trempants, donc moins sensibles à la vitesse de trempe, et il n'est pas nécessaire de réaliser des revêtements grâce à leurs propriétés de résistance à la corrosion.

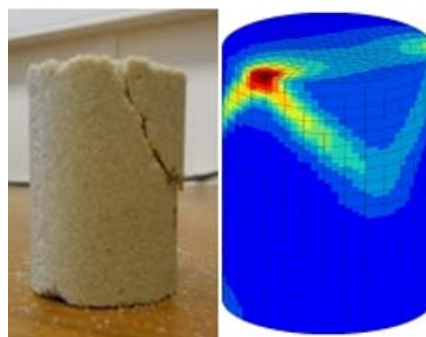
C'est dans ce contexte que l'entreprise Aperam a élaboré des nuances d'acier inoxydable martensitique dites « MaX », emboutissables à chaud. Ces aciers pourraient par exemple être proposés aux constructeurs automobiles pour certaines

## Présentations des doctorants de 1ère année

pièces destinées à l'absorption d'énergie. La température de transition ductile-fragile doit être en-dessous de  $-40^{\circ}\text{C}$  pour satisfaire le cahier des charges des constructeurs automobiles. Or la transition ductile-fragile de certaines nuances MaX est très sensible à la vitesse de trempe et peut dépasser  $-40^{\circ}\text{C}$  pour des refroidissements trop rapides.

L'objectif de cette thèse est d'améliorer la compréhension de l'effet du traitement thermique et de la microstructure sur la résilience de ces aciers, en vue d'aider à la conception de nouveaux alliages pour application automobile. Pour cela, une campagne expérimentale est menée afin d'identifier des critères de rupture quantitatifs en fonction de la température. L'analyse mécanique de ces essais permettra de déterminer une loi de comportement. En parallèle, les éléments microstructuraux qui régissent la rupture ductile et la rupture fragile seront analysés finement. L'ensemble permettra de lier les paramètres microstructuraux et les propriétés mécaniques, en particulier à basse température, afin d'améliorer la conception de ces nouvelles nuances d'aciers inoxydables.

comportement du noyau s'inscrit dans la famille des modèles à état critique, prenant en compte le comportement élastique non linéaire du matériau, son adoucissement en chargement déviatorique ainsi que la dégradation irréversible du liant polymère.



Comparaison expérience/simulation - Essai de compression uniaxiale



**HILTH William**

**Modèle simplifié de fragmentation de noyaux de fonderie en sable**

Directeur de thèse : David RYCKELYNCK

Partenaire industriel : Montupet

Partenaire académique : Mateis – INSA de Lyon

contact : david.ryckelynck@mines-paristech.fr

Lors de l'élaboration de culasses en aluminium, Montupet utilise une grande quantité de sable lié par de la résine polyuréthane afin de mouler les cavités internes.

Après la coulée, ces noyaux doivent être éliminés par un procédé mécanique appelé déburrage, consistant à un martelage continu de la pièce provoquant la fragmentation progressive du sable. La taille du dernier agrégat résiduel est un facteur déterminant de la qualité finale de la pièce et de sa validité.

Montupet ne dispose pas de modèles prédictifs concernant la modélisation du sable lié par de la résine polyuréthane ni du procédé de déburrage. Le projet FIMALIPO (Fissuration de matériaux agrégataires à liant polymère) a pour objectif une description de la procédure expérimentale d'évacuation des noyaux, le développement de la simulation de la fragmentation en utilisant une méthode de réduction de modèles, une analyse expérimentale du comportement mécanique du sable lié par résine à différentes températures de vieillissement ainsi qu'une validation et une comparaison entre expérience et simulation du déburrage. Le modèle mécanique développé pour caractériser le



**HULEUX Vincent**

**Etude de superalliages à base de nickel contenant du rhénium pour aubes monocristallines de turbine haute pression**

Directeur de thèse : Vincent MAUREL

Encadrement de thèse : Loïc NAZÉ, Vladimir ESIN, Alain KÖSTER, Virginie JAQUET (Safran)

Partenaire industriel : Safran Tech

contact : vincent.maurel@mines-paristech.fr

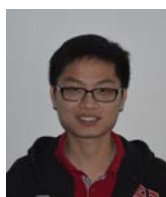
L'amélioration des performances des moteurs d'avions civils et militaires, réclame l'élévation de la température des gaz à l'entrée de la turbine. Les parties les plus chaudes des moteurs, notamment les aubes de la turbine haute pression, doivent alors faire face à une amplification des sollicitations thermomécaniques. Safran a pour objectif de développer ou d'optimiser de nouveaux superalliages monocristallins pour répondre à ces exigences.

Les propriétés de ces superalliages n'ont cessé d'évoluer dans le but d'améliorer à la fois leur résistance mécanique, leur stabilité microstructurale, leur résistance à l'oxydation et à la corrosion...

L'objectif de cette étude est de compléter les connaissances sur le rôle des éléments d'alliage, en particulier sur celui du rhénium sur la stabilité microstructurale et les propriétés en fluage des superalliages monocristallins à très haute température et à température intermédiaire.

## Présentations des doctorants de 1ère année

En particulier, cette étude permettra de vérifier et d'interpréter le durcissement de solution solide créé par les éléments d'alliage tels que le molybdène, le tungstène et le rhénium. Ce durcissement de solution solide est interprété selon plusieurs mécanismes physiques très différents. Cela est notamment le cas pour le rhénium qui, en fonction de sa concentration dans l'alliage, produit un effet bénéfique sur la durée de vie en fluage. L'un des points essentiels sera d'identifier à quel stade du fluage, le rhénium produit son effet.



**LE Hong-Thai**  
**Effets couplés de l'oxygène et de l'hydrogène sur la microstructure et le comportement mécanique des gaines en Zircaloy-4 et M5™ oxydées sous vapeur d'eau à haute température (conditions APRP)**

Directeur de thèse : J. CREPIN  
 Maître de thèse : M. LE SAUX et J.-C. BRACHET

Partenaire industriel : CEA  
 contact : jerome.crepin@mines-paristech.fr

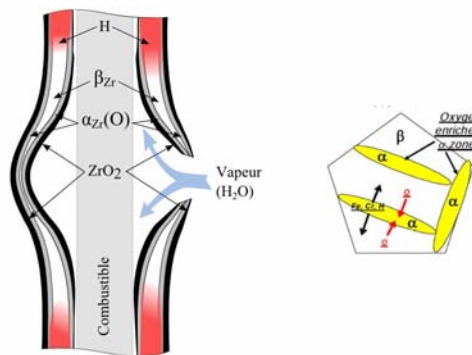
En situation hypothétique d'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP), initié par l'apparition d'une brèche dans le circuit primaire conduisant à une perte d'eau (réfrigérant primaire) et à une chute de pression dans ce circuit, la température de la gaine, sollicitée en pression interne, augmente rapidement (vitesse de plusieurs dizaines de °C/s). Dans ces conditions, la gaine se déforme et est susceptible de ballonner voire d'éclater. Par ailleurs, la gaine exposée à de la vapeur d'eau à haute température (800°C-1200°C typiquement) s'oxyde relativement rapidement avant d'être refroidie et trempée à l'eau par les systèmes de refroidissement d'urgence. L'oxygène réagissant avec le matériau diffuse en quantité significative dans le métal à haute température. Entre outre, le matériau peut dans certaines conditions absorber une quantité importante d'hydrogène, jusqu'à plusieurs milliers de ppm massiques localement. De nombreuses études ont montré que le comportement mécanique de la gaine pendant et après le refroidissement/trempe dépend essentiellement des teneurs en oxygène et en hydrogène du matériau, de la température et du scénario de refroidissement, car ceux-ci influencent l'état métallurgique de la gaine (transformation allotropique des phases  $\beta$  et  $\alpha$  du zirconium, ségrégation des éléments chimiques, diffusion de l'oxygène ...).

Jusqu'à présent, les effets isolés de l'oxygène et de l'hydrogène sur les propriétés mécaniques et métallurgiques de gaines en alliage de zirconium au cours et après refroidissement/trempe ont été étudiés de manière relativement approfondie au CEA en collaboration avec le Centre des Matériaux ; en particulier les thèses d'A. Stern (2007), A. Cabrera (2012) et R. Chosson (2014) ont abordé

l'effet de l'oxygène et celle d'I. Turque (2016) l'effet de fortes teneurs en hydrogène (pouvant aller jusqu'à 4000 wt.ppm). Néanmoins, les données mécaniques manquent encore pour les teneurs en hydrogène comprises entre ~600 et 2000 wt.ppm et pour les températures comprises entre 260 et 700°C pour ce qui concerne l'effet de l'oxygène. Par ailleurs, l'hydrogène et l'oxygène peuvent avoir des effets couplés, *a priori* non additifs, qui n'ont pas encore été investigués de manière systématique et approfondie.

L'objectif de la thèse, réalisée en partenariat avec EDF et AREVA, est donc d'évaluer les effets couplés de l'oxygène et de l'hydrogène (et de compléter l'étude de leurs effets isolés) (pour des teneurs allant jusqu'à des milliers de ppm massiques) sur les propriétés métallurgiques et mécaniques de gaines en alliages de zirconium (Zircaloy-4, alliage utilisé depuis plusieurs dizaines d'années par EDF et M5™, alliage plus récent d'AREVA) au cours et après refroidissement/trempe depuis les hautes températures (domaine  $Z_r$ ), i.e. dans des conditions simulant le scénario APRP.

La plupart des caractérisations sont réalisées sur des tubes de gainage de fabrication industrielle en Zircaloy-4 et M5™. Du zirconium de grade « Van Arkel », contenant très peu d'oxygène (~100 ppm mass.), est également utilisé pour certaines caractérisations afin d'isoler les effets de l'hydrogène.



Le phénomène de prise d'hydrogène secondaire et « partitioning » des éléments lors de la transformation de phase  $Z_r \rightarrow Z_r$  au refroidissement



**LU Fang**

**Etude des mécanismes d'endommagement en fatigue multiaxiale des Composites à fibres courtes : Thermoplastiques (PA66) renforcés de fibres de verres**

Directeur de thèse : Sabine CANTOURNET  
 Maître de thèse : Jean-Luc BOUVARD  
 Partenaire industriel : TOTAL Uhtchinson

contact : sabine.cantournet@mines-paristech.fr  
 Etude confidentielle



## Présentations des doctorants de 1ère année



**MONCLUS Victor-Manuel**

**Fabrication et étude de fibres piézoélectriques pour textiles auto-énergétiques**

Directeurs de thèse : Jacques RENARD,  
Jean-François HOICHEPIED

Partenaire industriel : FUI AUTONOTEX

contact : jacques.renard@mines-paristech.fr

Les textiles intelligents se sont développés depuis quelques années. Nombre de ces textiles ont des fonctions d'analyse sur des signes physiologiques tels que le rythme cardiaque et la fréquence respiratoire. Les projets existant actuellement concernent des vêtements ayant des capteurs rajoutés sur un textile et nécessitant une batterie pour leur alimentation. De ce fait, pour les applications des vêtements textiles dans le domaine de la sécurité, l'autonomie en énergie peut être un problème. Dans le cadre du développement des industries d'avenir et notamment pour une nouvelle filière textile, la BPI a décidé de soutenir le consortium AUTONOTEX. Ce dernier a pour but de développer à l'échelle industrielle des fibres multiéléments pouvant être tissées dans les machines industrielles conventionnelles et qui permettront au textile d'être autonome en énergie.

Dans ce but une solution a été d'utiliser un polymère présentant des propriétés piézoélectriques, le poly(vinylidène de fluorure) (PVDF). Ce polymère possède plusieurs phases cristallines :  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  et  $\alpha$ . La  $\beta$  est une phase non piézoélectrique, celle-ci se forme naturellement dans le polymère. Si on fait subir un étirement mécanique important, à partir de 200%, on obtient un mouvement des chaînes donnant la phase  $\beta$ . C'est cette conformation qui est recherchée car elle possède des propriétés piézoélectriques.

Dans le cadre de la mise en forme de la fibre, le polymère ne pourra pas subir l'étirement nécessaire pour avoir une phase  $\beta$ . Une autre méthode a donc été choisie, c'est l'ajout de nanoparticules d'oxydes ayant des charges surfaciques qui selon la littérature modifient la conformation de la chaîne polymérique et favorisent la phase  $\beta$ . Des oxydes assez répandus ont été choisis pour étudier leur influence à un taux de charges fixe. Un des oxydes les plus pertinents a été ensuite étudié à différents taux décroissants pour limiter l'impact sur la viscosité du polymère. Une fois que la nature et le taux optimum de la charge seront déterminés pour optimiser la phase  $\beta$ , il sera nécessaire de caractériser les propriétés des fibres extrudées avant et après tissage.



**MONIZ DA SILVA SANCHO Liliana**  
**Fabrication additive de pièces céramiques à haute performance par fusion laser sélective**

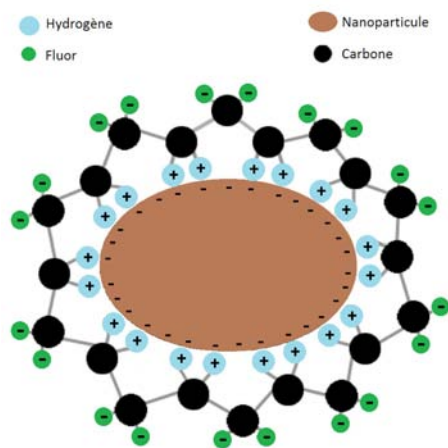
Directeur de thèse : M.H BERGER

Maître de thèse : C. COLIN

Encadrant : Jean-Dominique BARTOUT  
Projet CARNOT

contact : marie-helene.berger@mines-paristech.fr

L'amélioration des rendements des turboréacteurs passe par l'augmentation de la température de fonctionnement ainsi que par l'allègement des structures, ce qui nécessite le développement de nouvelles pièces de faibles densités et résistantes aux hautes températures. Pour répondre à cette problématique, les travaux de cette thèse portent sur une céramique oxyde  $Al_2O_3-ZrO_2$  à composition eutectique. Il s'agit d'un matériau léger, réfractaire, intrinsèquement résistant à l'oxydation et au fluage. La clé de l'application de ces matériaux à des pièces comme les aubes de turbine passe par le design de nouvelles structures à géométrie complexe. Le procédé de fusion laser sélective permet de réaliser ce type de géométrie de par une fabrication couche par couche de la pièce. Par ailleurs, ce procédé de fabrication incrémentale imposant des cycles anisothermes et des vitesses de refroidissement élevées offre la possibilité d'orienter le plus grand gradient thermique dans le sens de la fabrication et de contrôler la vitesse de solidification du bain. Ces deux paramètres rendent alors possible la maîtrise des microstructures afin qu'elles soient fines et orientées pour optimiser la tenue mécaniques des pièces au fluage. Toutefois, l' $Al_2O_3-ZrO_2$  n'absorbe que très peu les rayonnements lasers utilisés et résiste faiblement aux chocs thermiques, ce qui provoque la fissuration de couches consolidées. Ici, l'ajout de dopants à la poudre permet de pallier la quasi-transparence du matériau au rayonnement laser Nd:YAG qui est utilisé dans le cas présent. Quant à la fissuration, elle pourra être réduite par un préchauffage à

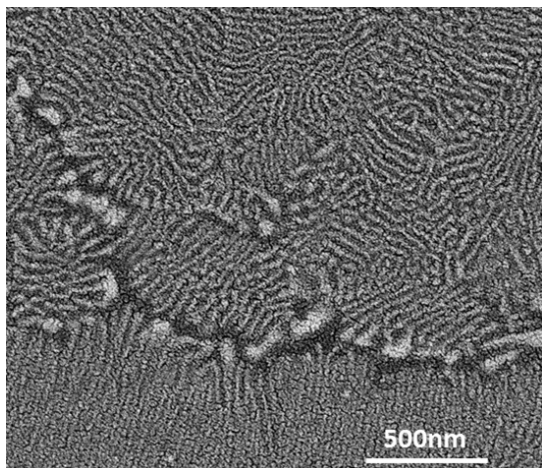


Mécanisme d'influence de la conformation du PVDF par une particule d'oxyde

## Présentations des doctorants de 1ère année

haute température du matériau.

L'objectif de la thèse consiste donc à établir des constructions stables et exemptes de défauts grâce à des études paramétriques sur la machine de fabrication. Après une étude sur les post-traitements de relaxation des contraintes résiduelles, la caractérisation mécanique de la matière consolidée sera évaluée. Enfin, pour une meilleure compréhension de l'interaction entre le laser et le lit de poudre, des mesures spectroscopiques sont envisagées de manière à connaître précisément les propriétés optiques des matériaux étudiés ainsi que leur évolution avec la teneur en dopant et les caractéristiques intrinsèques du milieu granulaire.



Microstructure cellulaire à fin eutectique lamellaire par solidification d'un bain de fusion  $Al_2O_3-ZrO_2$  vue en coupe



**PAGANO Fabrizio**  
**Méthodologie de prévision de la durée de vie en fatigue de structures stratifiées d'unidirectionnels**

Directeur de thèse : Alain THIONNET

Maître de thèse : Myriam KAMINSKY

Partenaire : ONERA

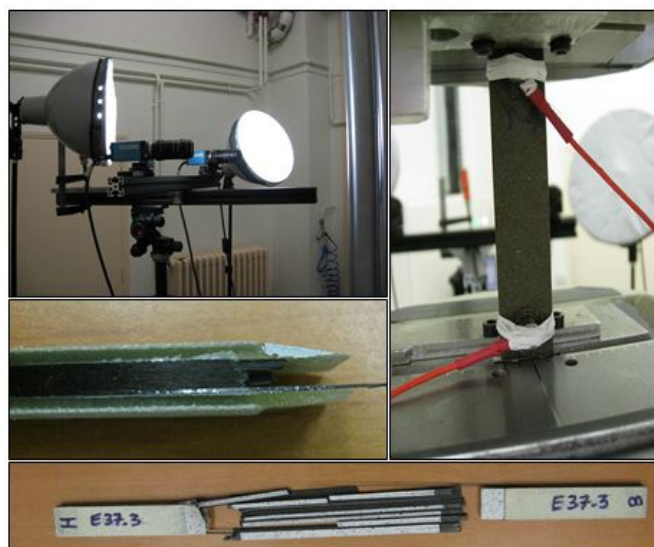
contact : [alain.thionnet@mines-paristech.fr](mailto:alain.thionnet@mines-paristech.fr)

En raison de leurs caractéristiques spécifiques élevées, les matériaux composites, et tout particulièrement les stratifiés d'unidirectionnels, sont de plus en plus largement employés pour la réalisation de structures primaires, telles que le caisson central, les ailes ou le fuselage. Afin d'optimiser les performances des pièces aéronautiques, les structures composites sont soumises à des chargements de plus en plus sévères, réduisant ainsi les marges de dimensionnement sous chargement statique et pouvant induire l'apparition de fissures

matricielles au sein du matériau. Cette fissuration n'a qu'une conséquence modérée sur la tenue statique de la pièce mais peut, sous chargements répétés, induire une réduction importante de la durée de vie. Contrairement aux idées reçues, les matériaux composites sont sensibles à la fatigue, en particulier pour les niveaux d'effort élevés envisagés actuellement.

La plupart de ces études porte sur la prévision de l'endommagement ou la rupture sous chargement de fatigue sur des éprouvettes simples de laboratoire. La prévision de la durée de vie de structures composites, représentatives de problématiques industrielles, n'est que très rarement abordée.

L'objectif de ce travail de thèse consiste à proposer une méthodologie permettant de prévoir la durée de vie de structures composites stratifiées, représentatives des problématiques de l'industrie aéronautique. Le but de ce travail est de développer des approches de prévision de la durée de vie et des performances résiduelles des structures. Deux types d'approches de la fatigue seront envisagées (l'une cyclique, l'autre incrémentale) afin de proposer une stratégie de calcul de la prévision de la durée de vie avec un coût de calcul raisonnable, transférable en bureau d'études. L'application aux cas structuraux est un enjeu majeur de cette thèse. Des essais de fatigue sur structures pourraient être réalisés pour valider la démarche mise en place et seraient confrontés aux résultats de calcul par éléments finis de l'implantation du modèle.



Essai de fatigue multi-instrumenté réalisé à l'ONERA, au sein du Département Matériaux et Structures Composites de Châtillon



## Présentations des doctorants de 1ère année



**PETIT Tom**

**Evolution des propriétés de traction et de ténacité du métal de base d'un alliage d'aluminium 6061-T6 avec l'irradiation et modélisation d'essais avec pop-in**

Directeur de thèse : Thilo MORGENEYER

Maître de thèse : C. RITTER (CEA Saclay)

Partenaire : CEA

contact : thilo.morgeneyer@mines-paristech.fr

Les alliages d'aluminium Al-Mg-Si sont utilisés dans de nombreux domaines, dont celui des réacteurs nucléaires expérimentaux. L'alliage 6061 présente des avantages multiples, notamment un compromis propriétés mécaniques / prix intéressant, une bonne résistance à la corrosion, une conductivité thermique élevée, une facilité de mise en forme ainsi qu'une transparence neutronique. Cet alliage 6061 est principalement utilisé à l'état revenu, noté T6, ce qui lui confère un nanodurcissement structural optimal, garantissant ses bonnes propriétés mécaniques.

Lors d'essais de ténacité, on constate cependant une présence très fréquente de « pop-in », instabilité locale conduisant à l'avancée brutale mais partielle de la fissure, associée à la chute brutale de la force. Pour un matériau présentant un comportement typiquement ductile comme l'aluminium, cette présence de pop-ins, qui dissipe peu d'énergie, est paradoxale.



Propagacion d'une fissure.

Le premier objectif de la thèse est donc de comprendre l'origine de ces pop-ins par l'intermédiaire de différents traitements thermiques (mise en solution, trempe, revenu), d'essais mécaniques (traction, ténacité,...), de caractérisations microstructurales (EDS, EBSD, MET, SAT...), de l'étude de la présence éventuelle d'un effet PLC, ainsi que par l'identification des micro-mécanismes d'endommagement (fractographie, laminographie...). De plus, l'irradiation présente en réacteur a tendance à rendre les matériaux moins ductiles. Grâce à une importante base de données ainsi qu'à des essais mécaniques et des observations microstructurales spécifiques sur matériau irradié, le deuxième objectif est de déterminer l'influence de l'irradiation neutronique sur la présence de ces pop-ins. Suite à ces études, l'objectif ultime est de modéliser, sur une base microstructurale fondée, les mécanismes conduisant aux pop-ins, notamment en identifiant

et en améliorant les lois de comportement phénoménologiques.



**SHVARTS Andrei**

**Couplage thermo-mécano-fluidique pour le contact et le frottement à petites et à grandes échelles**

Directeur de thèse : Georges CAILLETAUD

Maître de thèse : V. YASTREBOV

Partenaire : Safran Tech

contact : georges.cailletaud@mines-paristech.fr

Multi-scale and multi-physical problems are relatively unexplored topics in the domain of computational contact mechanics, and their solutions are crucial for a number of important industrial applications. In this Ph.D. project it is planned to consider two types of multi-physical contact problems : fluid-structure interaction and thermo-mechanical coupling. On the one hand, the boundary value problems for fluid transport and heat exchange strongly depend on the solution of the mechanical contact problem. On the other hand, the solution of the latter in turn is influenced by the hydrostatic and hydro-dynamic pressures of the fluid flow as well as by the thermal fields. As a result, these coupled problems are strongly nonlinear.

The surface roughness at microscopic scale determines the macroscopic properties of the contact interaction including thermal energy transfer across the contact interface and fluid transport along it. Taking into account roughness of contacting solids at small scales will enable us to construct new advanced models and perform the simulations of the considered multi-physical processes at the macroscopic scale relevant for industrial applications.

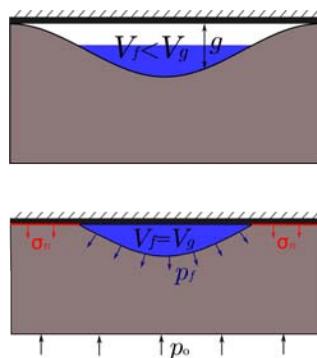
The implementation of the thermo-mechanical coupling for contact problem will allow us to simulate the heat production due to the frictional dissipation at contact interfaces as well as the heat exchange between the contacting parts. The solution of this problem at the roughness scale will serve to critically analyze existing constitutive laws for the contact heat transfer, which can be used to make simulations on the macroscopic scale. Industrial applications include such devices as aircraft and vehicle engines, brake systems, as well as large-scale problems like friction within geological faults and basal sliding of glaciers.

The coupling between the fluid flow and the mechanical contact will enable us to work on problems of sealing and lubrication. The former one is essential for aeronautic, automotive and nuclear industries, and these applications demand generalization of the solution of the coupled problem at the roughness scale for the macroscopic scale using the leakage laws. The lubrication problem is crucial for all

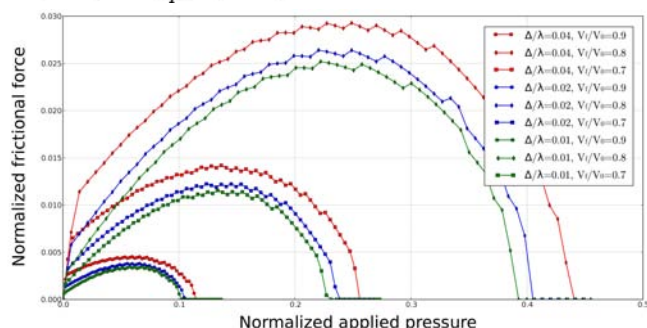


## Présentations des doctorants de 1ère année (fin)

industrial applications in which contacting components of a system are in relative motion, hence often in the presence of liquid lubricant, i.e. bearings, turbines, pumps, pistons, cutting tools etc.



(a) Sketch of the problem under study :  $g$  is the normal gap between contacting surfaces,  $V_f$  is the trapped fluid volume,  $V_0$  is the gap volume,  $p_0$  is the applied external pressure,  $p_f$  is the trapped fluid pressure and  $n$  is the normal contact pressure.



(b) Maximal value of the static frictional force vs applied pressure, for different values of the slope of the wavy surface profile ( $\lambda$  is the amplitude and  $\lambda$  is the wavelength of the profile) and different ratios of the fluid volume  $V_f$  to the initial gap volume  $V_0$ .



**TRABELSI Mariem**  
**Propagation et bifurcation de fissures de fatigue en plasticité généralisée**

Directeur de thèse : V. MAUREL  
 Maître de thèse : A.KÖSTER  
 Projet : ANR SEMAFOR

contact : [vincent.maurel@mines-paristech.fr](mailto:vincent.maurel@mines-paristech.fr)

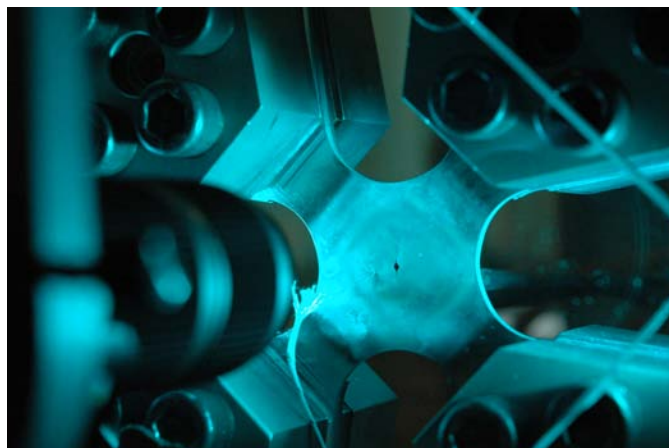
Sous les conditions de hautes températures, certaines pièces aéronautiques subissent des chargements sévères nécessitant de prendre en compte des fissures de fatigue. C'est au niveau des zones perforées des pièces, créant des zones de concentration de contraintes, que les fissures peuvent s'initier et se propager en un faible nombre de cycles. L'intensité des chargements et des températures provoque une forte plastification dans la zone de propagation de fissures rendant inopérantes les méthodes de modélisation de la propagation de fissures en condition de plasticité confinée. Ainsi, une étude sous les conditions de plasticité généralisée s'impose. Le matériau de l'étude est un superalliage à base de Cobalt, le

HAYNES 188.

L'un des paramètres influant sur le déroulement des essais est l'homogénéité du champ de température dans l'échantillon. Ce point a donc été abordé en premier lieu. Le but était d'obtenir un champ thermique uniforme. Pour se faire, nous avons conçu un inducteur spécifique. Une mesure par thermographie infrarouge a été utilisée pour caractériser le champ thermique obtenu. Cette vérification a montré que l'inducteur spécifique permet d'éliminer le gradient thermique au niveau de la zone utile de l'éprouvette. Un calcul numérique par la méthode des éléments finis a été effectué en prenant en compte ce champ thermique obtenu. Une partie expérimentale a été consacrée à la réalisation des essais de propagation de fissure à haute température en conditions de sollicitations biaxiales. Les éprouvettes d'essais sont entaillées de part et d'autre par rapport à un trou central. Cette zone est alors considérée comme zone de concentration de contrainte où, à haute température, nous avons observé l'initiation et la propagation de fissures pendant l'essai grâce à l'observation insitu.

Cette configuration a pour objectif d'imposer un chemin de fissuration en fonction du taux de biaxialité du chargement afin d'étudier la propagation et la bifurcation de fissures. Les fissures obtenues présentaient une large ouverture et une zone de plasticité bien étendue mettant en évidence le chargement en plasticité généralisée. Une technique de corrélation d'images a été utilisée pour définir le niveau de déformation durant chaque séquence d'essai.

Par la suite, nous allons poursuivre la réalisation des essais en définissant de nouvelles conditions de chargement biaxial permettant de mieux qualifier la bifurcation de fissures. Une modélisation numérique de ces essais sera envisagée afin d'atteindre l'objectif de la thèse qui est la construction de modèles robustes capables de prédire la vitesse de propagation pour des chargements fortement plastifiant.



Observation insitu de la fissuration

## Hommage à Michel GUTTMANN

Nous avons appris fin septembre 2016 le décès de Michel GUTTMANN, ancien chercheur du Centre des Matériaux.



Elève de l'École des Mines de Paris, Michel GUTTMANN est arrivé dans les premières années du Centre des Matériaux comme doctorant en 1968. Il a réalisé sa thèse d'Etat avec Paul KRAHE, responsable du groupe Aciers au Manganèse (de 1967 à 1973). Son sujet de thèse était *la fragilité de revenu (réversible) des aciers de construction induite par l'antimoine*. Une grande part du travail a été faite à l'ENS Ulm avec des mesures en micro-analyse nucléaire. Il a montré l'importance des interactions entre éléments sur les ségrégations à l'origine de la rupture intergranulaire et le rôle fondamental des anciens joints de grains austénitiques dans les aciers (voir ses articles dans *Met. Trans* et *Acta Met.* 1977, et *Surface Science* 1975 pour les curieux). Ses travaux lui ont valu des prix en France et aux Etats-Unis.

Au départ de Paul KRAHE pour le Brésil, il a pris la direction du groupe. Il a continué l'étude des propriétés des aciers de constructions en relation avec leur microstructure martensitique en lattes ou bainitique, et l'austénite résiduelle. Il a développé des aspects fondamentaux de la fragilité et des interfaces, en faisant l'acquisition d'un puis de deux spectromètres Auger à partir de 1974. Un essai de choc in situ de type Charpy sous ultra-vide lui a permis de faire des mesures très propres avec Philippe DUMOULIN (co-ségrégation du phosphore et éléments d'alliage).

A la suite d'une baisse du soutien contractuel de l'industrie, il est parti en 1981 au Centre EDF des Renardières pour continuer des études de métallurgie physique. Il a rejoint ainsi son épouse Danièle qui avait été une des pionnières de la microscopie électronique en transmission au Centre des Matériaux, à sa création, avec Jean-Loup STRUDEL, Francis LECROISEY et Ricardo COZAR.

Il a poursuivi sa carrière à l'IRSID à Maizières les Metz, au milieu des années 1990, puis à la Défense comme Directeur Scientifique de la Métallurgie. Au début des années 2000, il a rejoint le CEA comme Directeur Scientifique de la Métallurgie, au SRMP à Saclay où il a fini sa carrière.

Michel GUTTMANN était un grand scientifique, qui est resté fidèle à la métallurgie physique et à la physique tout au long de sa carrière. Au Centre, sa forte personnalité nous avait valu des débats passionnés et même houleux avec André PINEAU autour des propriétés mécaniques des aciers.

C'est lui qui a fait venir Donald MC LEAN, du NPL (National Physical Laboratory, près de Londres) au Centre pour une année sabbatique (1976-1977). Ce dernier a joué un rôle important dans le développement des études du CdM. Il a notamment montré l'importance du glissement intergranulaire dans l'endommagement en fluage et en fatigue-fluage. Il a surtout souligné l'intérêt d'une approche à l'aide d'éprouvettes axisymétriques entaillées pour caractériser l'effet de la multi-axialité sur les critères d'endommagement, que des chercheurs anglais utilisaient pour le fluage. On connaît le développement considérable de cette approche au Centre pour la rupture fragile et ductile à partir des travaux de François MUDRY et d'André PINEAU.

A propos de la fragilité intergranulaire, il s'émerveillait de l'inventivité des métallurgistes des générations précédentes qui avaient proposé des mécanismes pertinents sans avoir eu les moyens physiques de les vérifier.

A la fois chercheur passionné et brillant, c'était aussi un grand mélomane et un grand érudit des sciences de l'homme.

source : Luc Rémy

### Le Bulletin du Centre des Matériaux

Mines Paristech - Centre des Matériaux P.M. FORT  
ARMINES - UMR CNRS 7633  
B.P. 87, 91003 Evry cedex

<http://www.mat.mines-paristech.fr>



Rédactrice : Françoise DI RIENZO  
Responsable de production : Jérôme CREPIN  
Comité de relecture : O. ADAM, F. DI RIENZO, Y. BIENVENU