



## Editorial

|     |  |
|-----|--|
| 1   | Editorial                                |
| 1   | Faits marquants                          |
| 1   | Le Club Z-set                            |
| 2   | Soutenances                              |
| 3   | Stagiaires                               |
| 3   | Le kiosque d'avril-mai                   |
| 3   | Séminaires                               |
| 4-9 | Soutenances des doctorants de 1ère année |
| 10  | Un mystère enfin résolu                  |

C'est le printemps, période des jeunes pousses, la saison idéale pour donner la parole aux doctorants de première année, et vérifier que la thèse débute dans de bonnes conditions.

Pour vous lecteurs, c'est aussi l'occasion de faire un tour d'horizon des projets de recherche portés par le CdM ; rendez-vous dans ces pages.

A contrario, le printemps voit peu de thèses se terminer. Cependant une thèse de doctorat et une Habilitation à Diriger des Recherches ont été soutenues sur cette période.

La production scientifique se traduit aussi par des articles, des participations à des ouvrages, et le kiosque vous en livre les références.

Bientôt les vacances, et le temps de la paille dans les cheveux, ... mais pas seulement. Découvrez en dernière page pourquoi certains fromages ont donc des trous !

*Bonne lecture  
Pour la Tribune  
Françoise DI RIENZO*

## Faits marquants de mai-juin 2015

- **22/05/2015** : soutenance d' HDR de Henry PROUDHON
- **02/06/2015** : séminaires invités
- **02/06/2015** : séminaire des responsables réseaux et moyens de communication de MINES ParisTech
- **09/06/2015** : Club Z-set
- **12/06/2015** : soutenance de thèse de doctorat de Victor DE RANCOURT
- **22-23/06/2015** : soutenances des doctorants de 1ère année

## Faits marquants de juillet 2015



La réunion de printemps du club des utilisateurs du code Z-set s'est tenue le 9 juin au Centre des Matériaux, avec le programme suivant :

« Energy balance of an iceberg calving event at an outlet glacier in Greenland »  
Amandine Sergeant-Boy, Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP)

« Le nouveau Modèle Discret-Continu (MDC): une formulation consistante pour la simulation efficace de la dynamique de dislocations 3D »

Olivier Jamond, Onera - Châtillon

« Influence de la transformation sur la genèse des contraintes résiduelles au cours de la trempe depuis le domaine de l'alliage de titane -m elastable Ti17 »  
Julien Teixeira, Institut Jean Lamour (IJL), Nancy

« Simulation des mécanismes de déformations micromécaniques dans un alliage AlSi »

Aly Tireira, Onera Châtillon / Ecole

## Le club Z-set

Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne

« Le recalage de modèle par éléments finis couplé à des mesures de suivis optiques pour d'écrire des phénomènes localisés »

Anne-Sophie Caro-Bretelle, Ecole des Mines d'Ales

« L'approche par champ de phase : pourquoi, comment et jusqu'où? »

Benoît Appolaire, LEM, ONERA/CNRS

« L'approche par champ de phase : Applications »

Kais Ammar, Centre des Matériaux - Mines ParisTech

« Simulation des procédés de fabrication additive, stratégies de modélisation et application avec Zset »

Guillaume Marion, Centre des Matériaux - Mines ParisTech

**Source : F. AZZOUZ**

## Soutenances

### Thèse de doctorat

#### Modélisation de l'oxydation des aciers inoxydables polycristallins par une approche en champs de phases couplée avec la mécanique

Victor DE RANCOURT

le 12 juin 2015

Les aciers austénitiques et alliages à base de nickel sont des matériaux de choix pour leurs propriétés mécaniques à haute température. L'enrichissement en chrome améliore leur durabilité de part la formation d'une couche d'oxyde protectrice à l'exemple de la chromine (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Il est néanmoins établi, par des essais mécaniques sous vide, que l'oxydation réduit de manière notable leur durée de vie en fatigue. En effet, la croissance d'oxyde peut être accompagnée d'une introduction de défauts tels que l'injection de lacunes, d'éléments délétères comme l'hydrogène mais également de contraintes résiduelles, etc., dans le métal. Les micromécanismes de fissuration sont ainsi régis par des interactions complexes entre l'environnement et la surface du métal,

faisant intervenir composition chimique et microstructure.

Aujourd'hui, les enjeux de sécurité et de compétitivité font de la prévision de la durée de vie de ces alliages une nécessité pour l'industrie nucléaire. L'augmentation de la dimension des modèles permet de prendre en compte de manière explicite les interactions multiphysiques du couple oxyde/métal sous l'action d'un chargement mécanique. La thèse s'inscrit dans cette démarche et propose une formulation d'un modèle de champ de phases couplé avec la mécanique et fondé sur les principes de la thermodynamique des milieux continus. Le comportement effectif de l'interface est présentement obtenu via des méthodes d'homogénéisation permettant de combiner des comportements mécaniques dissemblables, à l'image d'un substrat ductile et de son oxyde fragile. Les contraintes induites par la formation d'oxyde et également par le chargement mécanique peuvent être relaxées viscoplastiquement, de manière isotrope et anisotrope, respectivement dans l'oxyde et dans le substrat. Des simulations par éléments finis de l'oxydation généralisée ainsi que de l'oxydation intergranulaire sous

chargement mécanique sont effectuées. Ces dernières mettent en évidence la possibilité d'un phénomène d'oxydation catastrophique par la génération de contraintes de tensions dans l'oxyde fragile, lesquelles peuvent être localisées le long des intrusions d'oxyde dans les joints de grains.

**Source :** V. DE RANCOURT

### Habilitation à Diriger les Recherches

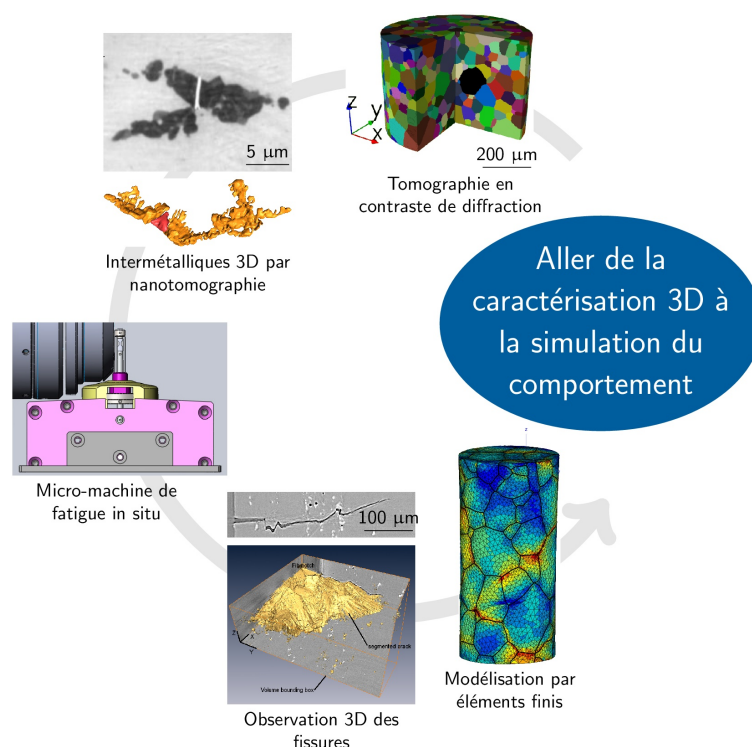
#### Three dimensional study of deformation and fatigue fracture in polycrystalline materials: from synchrotron X-ray investigations to computational mechanics

Henry PROUDHON

le 22 mai 2015

(voir figure ci-dessous)

**Source :** H. PROUDHON



## Stagiaires

**Di LI**, du 8 mai au 30 septembre 2015, dans l'équipe SIP avec Alain THOREL, sur le sujet "Architected interfaces and electrochemical modelling in an anode".

**Jian CHEN**, du 13 mai au 11 septembre 2015, dans l'équipe SIP avec Alain THOREL sur le sujet "Electrodéposition - Electrophorèse".

**Brandon-Ly CAURO**, du 18 mai au 10 juillet 2015, dans l'équipe CHT avec Alain KOSTER sur le sujet "Etude du vieillissement d'un alliage d'aluminium".

**Omar ADDALOU**, du 18 mai au 10 juillet 2015, dans l'équipe CHT avec Alain KOSTER sur le sujet "Etude du vieillissement et de l'endommagement d'un colaminé cuivre/invar/cuivre".

**Soruban SELVARAJAH**, du 21 mai au 3 juillet 2015, dans l'équipe ATIE avec René CLUZET sur le sujet "Usinage de pièces mécaniques".

**Steven TOUSSAINT**, du 26 mai au 4 juillet 2015, dans l'équipe ATIE avec Cédric TOUSSAINT sur le sujet "Réalisation d'une IHM pour appareil de laboratoire".

**Jennifer BLONDEL**, du 1er juin au 30 novembre 2015, avec Eveline HERVE-LUANCO et Sébastien JOANNES sur le sujet " Homogénéisation des propriétés élastiques, thermiques et thermo-élastiques des composites renforcés par des particules ou par des fibres multicouches".

**Source** : C. ROUIL

## Le kiosque avril-mai

### Revue à comités de lecture

RANC N., BLANCHE A., RYCKELYNCK David, CHRYSOCHOOS A., POD preprocessing of IR thermal data to assess heat source distributions, Experimental mechanics, 2015, 55, p. 725-739

DEZECOT Sébastien, BROCHU M., Microstructural characterization and high cycle fatigue behavior of investment cast A357 aluminum alloy, International journal of fatigue, 2015, 77, p. 154-159

BASSEVILLE Stéphanie, CAILLETAUD Georges, An evaluation of the competition between wear and crack initiation in fretting conditions for Ti-6Al-4V alloy, Wear, 2015, 328-329, p. 443-455

AGNELLI S., BALDI F., BLACKMAN B.R.K., CASTELLANI L., FRONTINI P.M., LAIARINANDRASANA Lucien et al., Application of the load separation criterion in J-testing of ductile polymers : a round-robin testing exercise, Polymer testing, 2015, 44, p. 72-81

CAO T.S., MAZIERE Matthieu, DANAS K., BESSON Jacques, A model for ductile damage prediction at low stress triaxilities incorporating void

shape change and void rotation, International journal of solids and structures, 2015, 63, p. 240-263

BOUCHOUCHA M., TIELENS F., GASLAIN Fabrice et al., Melanin polymerization held in check : a composite of dihydroxyphenylalanine with zeolite beta, Journal of physical chemistry C, 2015, 119, p. 8736-8747

TRIANTOU K.I., PANTELIS D.I., GUIPONT Vincent, JEANDIN Michel, Microstructure and tribological behavior of copper and composite copper + alumina cold sprayed coatings for various alumina contents, Wear, 2015, 336-337, p. 96-107

MARAIS Anthony, MAZIERE Matthieu, FOREST Samuel, PARROT A., LE DELLIOU P., Influence of static strain aging on the cleavage fracture of a C-Mn steel, Engineering fracture mechanics, 2015, 141, p. 95-110

MARTINEZ Rémi, LAROUCHE D., CAILLETAUD Georges, GUILLOT I., MASSINON D., Simulation of the concomitant process of nucleation-growth-coarsening of Al<sub>2</sub>Cu particles in a 319 foundry aluminum alloy, Modelling and simulation in materials science and engineering, 2015, 23, 045012, 22 p.

**Source** : O. ADAM

## Séminaires

Le 2 juin, séminaires invités au Centre des Matériaux :

« A bottom-up reformulation of the micromorphic theory: applications in plasticity and damage mechanics »

Dr. Leon-Hien Poh de la National University of Singapore (Dpt of Civil and Environmental Engineering)

« In situ 3D observation of ductile failure mechanisms in cast iron under shear loading »

Lutz ZYBELL de la TU Bergakademie Freiberg

**Source** : F. DI RIENZO



## Soutenances des doctorants de 1<sup>ère</sup> année

**ABDESSELAM Hayat**

**Vers une meilleure compréhension des mécanismes d'amorçage en fatigue de l'acier THR ML340**

*Directeur de thèse : J. CREPIN*

*Maîtres de thèse : T. MORGENEYER,  
A.L ROUFFIE*

*Partenaire : SAFRAN*

**ABECASSIS Manon**

**Micro fissuration de matériaux soudés en conditions de fatigue multiaxiale**

*Directeur de thèse : V. MAUREL*

*Maître de thèse : A. KOSTER*

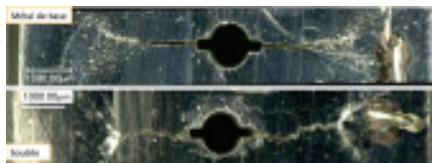
*thèse OPEN*

Le soudage est un des procédés d'assemblage les plus utilisés industriellement dès lors qu'il est nécessaire de réaliser une pièce avec deux matériaux différents, ou bien d'assembler deux pièces de géométries complexes entre elles. Le soudage modifie localement la microstructure par rapport à celle du métal de base, et donc les propriétés mécaniques. Le cordon de soudure devient le lieu privilégié d'amorçage et de propagation de fissures pouvant conduire à la rupture des pièces soumises à des chargements complexes en fonctionnement : le chargement est souvent non-uniforme, il peut être multiaxial, d'amplitudes et de directions variables avec le temps.

Dans notre étude, l'acier ferritique est soudé par gaz inerte et présente un gradient de microstructure : à partir d'une taille de grains de 20 µm dans le métal de base, une zone à gros grains d'environ 200 µm est créée par solidification du métal de base sous l'action du soudage. Des essais de fissuration uniaxiaux pilotés en contrainte ont mis en évidence la différence de comportement de la fissure au sein du métal de base et du joint soudé. Si dans le métal de base la fissure est rectiligne, au contraire dans le joint soudé, elle est tortueuse et

présente des bifurcations locales importantes, montrant ainsi qu'un effet de la microstructure est bel et bien présent.

Par la suite, nous allons soumettre des éprouvettes entaillées à des contraintes biaxiales coplanaires afin d'étudier l'influence du chargement sur la propagation de fissure par rapport à la position du joint soudé et au gradient de microstructure existant au sein de celui-ci.



*Propagation d'une fissure dans le métal de base (en haut) et dans un joint soudé (en bas)*

**BARGAOUI Hiba**

**Simulation de la déformation des noyaux de fonderie durant la coulée**

*Directeur de thèse : G. CAILLETAUD*

*Maître de thèse : F. AZZOUC*

*Partenaire : MONTUPET*

Les noyaux de fonderie sont un mélange de sable silicieux et d'une résine qui joue le rôle d'un liant. Ces noyaux servent à réaliser les cavités intérieures des pièces métalliques et sont placés dans le moule métallique juste avant la coulée. Durant la coulée, les noyaux subissent la pression métallo-statique et sont soumis à des températures élevées. Sous ces conditions extrêmes, et avec le développement de noyaux encore plus fins ayant des formes plus complexes, ils présentent un certain niveau de déformation. A l'échelle industrielle, certaines étapes supplémentaires ont été ajoutées à la chaîne de fabrication des noyaux afin d'éviter cette déformation. La caractérisation mécanique et thermique des noyaux est importante et constitue une étape manquante dans la chaîne de calcul du processus de coulée.

Le contrôle des déformations des noyaux permettrait donc d'importantes économies sur les coûts de développement. Pour rendre cette estimation possible, il faut passer par des calculs de structures par éléments finis complexes, qui mettent en œuvre une modélisation de l'écoulement du métal liquide puis de la solidification, des champs thermiques, et de la mécanique du solide. Cette approche n'est pas encore pratiquée de façon complète dans l'industrie. Pour la rendre possible, il faut en particulier disposer d'une caractérisation robuste des noyaux de sable, du point de vue de leurs propriétés thermiques et mécaniques.

L'objectif de cette thèse est de déterminer un modèle de comportement capable de prendre en compte la viscosité du matériau, son endommagement, et surtout son évolution en fonction du temps (température) en raison de la disparition possible du liant.



*Culasse en aluminium et noyau de sable*

**BETTONTE Francesco**

**Simulation de la fissuration ductile des métaux en grandes déformations**

*Directeur de thèse : J. BESSON*

*Partenaire : ONERA*

La simulation numérique est utilisée lors du processus de conception et de pré-dimensionnement des structures : elle est effectuée pour réduire le nombre d'essais à mener, ou encore pour répondre à l'impossibilité d'effectuer des essais sur des structures de grande taille. Il est alors indispensable de :

## Soutenances des doctorants de 1<sup>ère</sup> année

- disposer d'un modèle qui soit représentatif du comportement du matériau ;
- être en mesure d'en identifier les paramètres ;
- assurer la convergence et la cohérence des calculs éléments finis utilisant ce modèle.

Cette démarche est celle que le *Département des Matériaux et des Structures Métalliques* de l'Onera, qui finance cette thèse, souhaite mettre en œuvre pour simuler la ruine de structures aéronautiques. Dans cette thèse, on s'intéresse en particulier aux métaux à comportement ductile. Ce type de comportement se caractérise par une dissipation relativement importante d'énergie due à la plasticité et par des déformations à rupture élevées. Le caractère adoucissant du comportement du matériau conduit à des déformations localisées dans une bande appelée bande de localisation. C'est dans cette bande qu'ont lieu les phénomènes d'endommagement, qui se manifestent par la formation, la croissance et la coalescence des micro-cavités qui mènent à la formation d'une fissure macroscopique. La taille de cette bande n'est pas correctement reproduite dans des simulations numériques lorsqu'on utilise des modèles d'endommagement classiques, où la description de comportement du matériau est locale. Il s'agit du problème bien connu de localisation numérique des déformations : les résultats dépendent du maillage (non seulement de sa taille mais également de son orientation). Ceci est dû au manque d'information sur la structure interne du matériau. Les solutions proposées à ce problème visent à introduire une information supplémentaire dite « longueur interne ». Il s'agit d'un paramètre relié à la taille réelle de la bande de localisation dont l'identification est une question toujours ouverte. L'objectif principal de la thèse est de développer et de mettre en œuvre une stratégie d'identification des paramètres du modèle et du calcul (notamment de la longueur interne à

introduire) en utilisant des mesures effectuées par corrélation d'images. Cette technique permet de mesurer, à partir de deux images correspondant à des chargements différents, des champs de déplacement sur toute la zone observée. Contrairement aux techniques de mesures traditionnelles, qui fournissent des valeurs ponctuelles, la corrélation d'images fournit donc des informations plus riches. La stratégie d'identification sera d'abord mise en place à partir d'essais sur éprouvettes simples, puis les résultats seront validés par comparaison essai-calcul sur un cas 3D complexe.

### CAROUX Julien

#### **Conception de fibres hydrogels hautes performances pour la reconstruction tissulaire .**

*Directeur de thèse : L. LEIBLER*

*Maître de thèse : L. CORTE*

*Partenaire : ANR*

Étude confidentielle

### COPPO Ivan

#### **Fabrication additive de pièces Céramiques à haute performance par Fusion Laser sélective**

*Directeur de thèse : M.H BERGER*

*Maître de thèse : C. COLIN*

*Partenaire : ANR CEFALÉ*

*Etude retardée*

### DEFAISSE Clément

#### **Rupture ductile des aciers pour l'aéronautique**

*Directeur de thèse : J. BESSON*

*Maîtres de thèse : M. MAZIERE,  
L.MARCIN (SAFRAN)*

*Partenaire : SAFRAN*

De nombreuses pièces aéronautiques

situées dans les trains d'atterrissages, les roues, ou les moteurs sont dimensionnées en garantissant leur non déformation plastique en fonctionnement usuel, mais également en considérant des cas de chargement dit extrêmes. Le but de ces études est alors d'évaluer la charge limite que peut supporter une pièce ou un assemblage avant rupture. Des essais sur structure, couplés à des calculs et analyses par éléments finis sont souvent réalisés pour obtenir cette charge limite. Pour un certain nombre de pièces, le mode de ruine qui conduit à la rupture est lié à l'épuisement de la capacité de déformation plastique des zones critiques du composant. Dans d'autres cas, c'est une instabilité (souvent localisé) de type flambage qui conduit à la ruine de la pièce. En outre, une légère modification géométrique de la forme des pièces, ou du comportement des matériaux constituant peut mener à un changement brutal du mode de ruine. Afin de favoriser l'émergence de nouveaux produits tout en réduisant les coûts de développement, il convient de disposer de méthodologies permettant de dimensionner au plus juste les structures, d'optimiser les intervalles d'inspection et de réduire les coûts de maintenance. Les aciers maraging sont des aciers possédant après traitement thermique une très haute limite d'élasticité et en contrepartie un allongement à la striction très faible (moins de 5%). La ductilité apparente donnée par l'allongement réparti à la rupture reste également assez faible (~ 10 %) même si localement le matériau se déforme de plusieurs dizaines de pour cent avant de rompre. Or les propriétés d'érouissage, de ductilité, et de ténacité ont un rôle majeur sur la tenue des pièces en service. Le comportement en rupture ductile des aciers maraging est jusqu'ici assez peu étudié dans la littérature, d'autant moins pour les taux de triaxialité faibles (entre 0 et 1/3) auxquels sont soumises les pièces en service (flexion et/ou torsion). Il ressort de ces études que les traitements thermiques effectués sur ces matériaux

## Soutenances des doctorants de 1<sup>ère</sup> année

avant utilisation sont susceptibles de fortement modifier leurs propriétés mécaniques. Il est ainsi possible d'augmenter légèrement l'allongement à striction en contre-partie d'une diminution de la limite élastique et/ou de la contrainte ultime. Il paraît notamment très important de s'intéresser au comportement à la rupture de ces aciers pour les faibles taux de triaxialité en s'inspirant des travaux récents dans ce domaine sur d'autres alliages métalliques d'un point de vue expérimental ou numérique. Le rôle de l'écroutissage sur la rupture ductile à faible taux de triaxialité sera donc un point essentiel à étudier.

Deux aciers maraging aux propriétés mécaniques différentes seront étudiés afin d'évaluer l'influence de l'écroutissage sur la tenue mécanique de structures aéronautiques. Un des aciers sera élaboré en petite quantité à partir de la base métallurgique du premier acier de manière à obtenir un matériau avec une tenue mécanique dégradée mais un allongement réparti à la rupture plus important. Des essais mécaniques sont envisagés afin de caractériser le comportement à la rupture de ces matériaux sous différents types de chargement. Ces données permettront par la suite de choisir et d'identifier des modèles de rupture ductile associés et de comparer numériquement la tenue de structures soumises à des chargements multiaxiaux.



Rupture instable d'un tube en acier maraging en torsion (source: Snecma)

### DINH TRONG Tuan

#### Modèle linéique enrichi par hyper-réduction pour la prévision simplifiée des contraintes résiduelles de soudage

Directeur de thèse : D. RYCKELYNCK  
Partenaire : EDF

Dans le contexte industriel, le soudage est souvent utilisé pour assembler des matériaux. Cependant, il produit les déformations et contraintes résiduelles qui influencent sa qualité. La simulation numérique de soudage (SNS) est nécessaire pour anticiper les effets de soudage, c'est un calcul complexe, non linéaire, des phénomènes thermomécaniques couplés et il dépend de plusieurs paramètres. Par conséquent, la SNS demande beaucoup de temps de calcul en particulier dans le cas de soudage multipasses où le nombre de passe est important. L'objectif de la thèse est d'utiliser la méthode d'hyper-réduction pour diminuer les temps de calcul tout en conservant des résultats pertinents. Nous pouvons comparer cette méthode avec les autres méthodes simplifiées dans la SNS. Ensuite, nous tenons en compte le caractère linéique des cordons de soudage pour construire le modèle linéique qui est plus simple que le modèle réductif normal.

### FEKIRI Hiba

#### Matériaux architecturés à base de cuivre pour l'électronique de puissance (substrats de semiconducteurs)

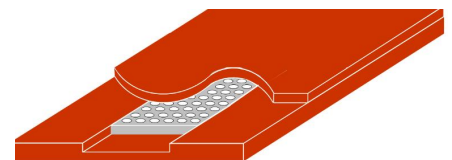
Directeurs de thèse : Y. BIENVENU, V. MAUREL

Maîtres de thèse : A. KOSTER, V. ESIN

Partenaire : FUI MeGan (Pôles de compétitivité Minalogic et Mov'eo)

Le travail de thèse porte sur le substrat, une partie essentielle de l'assemblage dans les modules électroniques, dont le rôle est mécanique (la fixation de la puce par l'insertion d'un matériau de report d'épaisseur aussi faible que celui

de la puce de 100 à 300  $\mu\text{m}$ ) et thermique (l'évacuation du flux thermique dissipé par la partie active de la puce vers le système de refroidissement fixé sous le substrat). Au cours du fonctionnement du module, le substrat est soumis à des cycles en température induits par le fonctionnement de la puce avec des cycles imposés par l'échauffement du composant par les pertes dissipées et par l'environnement. Ces cycles génèrent des contraintes thermiques qui peuvent endommager le substrat et induire des élévations locales de température menant à la défaillance du système électronique. Les substrats actuels à base de céramiques (DBC) ne suffisent plus à assurer l'intégrité du module. La PME Griset, un producteur des laminés pour l'électronique, en collaboration avec le Centre des Matériaux, a mis au point un nouveau substrat à pont thermique à base de cuivre et d'Invar fabriqué par le colaminage (Fig. 1). Ce substrat présente un compromis entre une bonne conductivité thermique et une faible dilatation. L'objectif du travail de thèse consiste d'abord à caractériser la tenue en fatigue thermique du colaminé dans le cas des sollicitations extrêmes comme celles rencontrées dans le domaine aéronautique. Cette caractérisation sera complétée par une modélisation numérique. Il s'agit d'optimiser le substrat afin d'avoir un remplissage complet des ponts thermique par le cuivre et d'améliorer la qualité du soudage au niveau des interfaces.



Substrat colaminé à base de Cu/Invar développé par le Centre des Matériaux et la société Griset



## Soutenances des doctorants de 1<sup>ère</sup> année

**FELLAH Clémentine**

**Influence d'interphases carbonées sur le comportement mécanique de composites SiC/SiC**

Directeur de thèse : M.H. BERGER

Maître de thèse : C. SAUDER

Partenaire : CEA

Étude confidentielle

**LEGER Pierre- Emmanuel**

**Dépôt par projection dynamique par gaz froid (Cold Spray) de revêtements à base d'aluminium sur acier de structure**

Directeur de thèse : M. JEANDIN

Étude confidentielle

**MATEUS FREIRE Lucie**

**Etude des mécanismes de déformation et de rupture à haute température d'un acier de structure des réacteurs de quatrième génération**

Directeur de thèse : A.F. GOURGUES  
LORENZON

Maître de thèse : A. COURCELLE

Partenaire : CEA

**OLIVIER Clément**

**Identification de modèles non linéaire par décomposition tensorielle et factorisation de calculs intensifs**

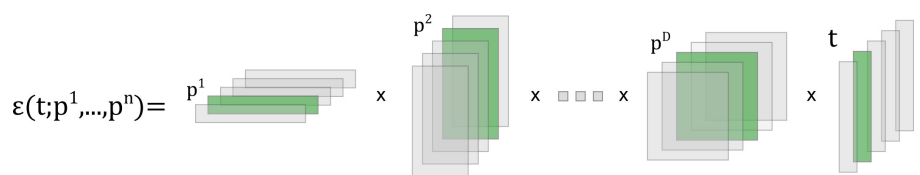
Directeur de thèse : D. RYCKELYNCK  
Partenaire : SAFRAN

Le dimensionnement des moteurs d'hélicoptères passe par la certification de leur fonctionnement lors de scénarios imposés. Lors d'épisodes d'urgence, il peut être nécessaire d'utiliser les moteurs hors de leur domaine d'utilisation nominale. Les aubes de turbines haute pression

subissent, dans ce cas, des contraintes violentes en traction et en température. La modélisation du comportement anisotherme des monocristaux de superalliage base nickel (utilisés dans la fabrication des aubes) en vue d'une compréhension de leurs déformations et de leur endommagement nécessite l'utilisation de lois matériaux de plus en plus complexes. Le modèle ad hoc POLYSTAR, défini par une série d'équations différentielles non-linéaires couplées, nécessite l'identification d'une vingtaine de coefficients matériaux.

La procédure d'identification des coefficients matériaux consiste à comparer des essais expérimentaux avec des simulations numériques du modèle, jusqu'à obtention d'un jeu de paramètres permettant de confondre les résultats. Lorsque le temps d'une simulation numérique n'est plus négligeable, il devient inenvisageable de parcourir de manière « exhaustive » l'espace des paramètres. En effet, le nombre de simulations à effectuer croît exponentiellement avec le nombre de coefficients à identifier. L'objectif de la thèse est de proposer aux experts matériaux, une nouvelle méthodologie de travail pour l'identification de modèle à grand nombre de paramètres.

La démarche consiste à construire un modèle de substitution, en appliquant des méthodes de décomposition tensorielle au modèle physique. La décomposition tensorielle est réalisée sur la base de résultats de simulations du modèle physique, choisies de manière parcimonieuses afin de satisfaire l'exigence de précision tout en minimisant les coûts de calcul. L'évaluation du modèle de substitution, une fois construit, consiste simplement en une série de multiplications matricielles (voir figure). Cette caractéristique donne la possibilité de fournir aux experts des outils de visualisation de la réponse du modèle (POLYSTAR) en explorant l'espace des paramètres en temps réel.



La figure illustre la série de multiplications matricielles nécessaire pour l'évaluation du modèle de substitution pour un jeu de paramètres donné  $(p^1, \dots, p^n)$  à un instant  $t$ . La fonction epsilon représente l'allongement.

Afin de réaliser la décomposition tensorielle, les intervalles sur lesquels sont définis chaque paramètre (et le temps) ont été discrétisés. Dans chaque groupe de matrice, chaque matrice est associée à un point de la discrétisation de l'intervalle du paramètre (ou du temps) correspondant. Sont multipliées uniquement les matrices vertes.

## Soutenances des doctorants de 1<sup>ère</sup> année

**REN Sicong**

**Interactions entre localisations et endommagement lors de la rupture d'alliages métalliques par mesures in situ et calculs EF 3D régularisés**

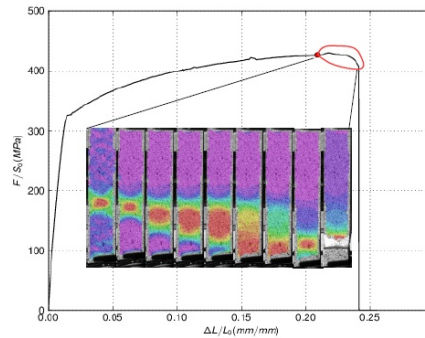
Directeurs de thèse : S. FOREST, G ROUSSELIER

Maître de thèse : T. MORGENEYER, M. MAZIERE

Le lien entre la localisation de la déformation et l'endommagement pour les matériaux ductiles est encore un sujet à explorer, notamment en présence de vieillissement par la déformation.

Les phénomènes de localisation de la déformation dus au vieillissement sont observés dans de nombreux alliages industriels comme les aluminiums séries-2000 ou 5000, ou par exemple, dans le cas des aciers C-Mn pour lesquels un creux de ductilité est observé dans la gamme de température où les effets de vieillissement dynamiques (effet de Portevin-Le Chatelier) sont les plus marqués [Wang H 2011]. Récemment, des bandes inclinées de localisation de la déformation ont été observées à environ 800 microns de la pointe de l'entaille avant l'apparition de l'endommagement d'une éprouvette CT de l'alliage Al-Cu-Li AA2198, qui est un nouvel alliage pour l'aéronautique [Morgeneyer TF et al. 2014]. Et finalement, une rupture en biseau qui suit la rupture plate se forme dans une de ces bandes.

L'objectif de la thèse est de mieux comprendre la localisation due au vieillissement par la déformation, et d'évaluer son influence sur le développement de l'endommagement ductile ou éventuellement sur la rupture en biseau. Pendant cette thèse, un nouveau modèle de vieillissement dynamique va être développé et identifié sur un acier C-Mn et l'alliage AA2198. Les résultats expérimentaux, les essais de traction et DIC à plusieurs vitesses de déformation vont être comparés avec les simulations numériques.



La propagation d'une bande de Portevin-Le Chatelier avant la rupture d'une éprouvette lisse de l'alliage AA2024.

**SAKIMOTO Takahiro**

**Etude de fracture inverse pendant DWTT**

**Assessment of inverse fracture in line pipe steels during Drop Weight Tear Test (DWTT)**

Directeur de thèse : J. BESSON

Partenaire : JFE Steel Corporation

This study aims at the simulation model representing the slant ductile tearing and ductile to brittle transition during DWTT (Drop Weight Tear Test) in line pipe steel. The study includes the description of: (i) the anisotropic plastic behavior, (ii) slant ductile behavior and (iii) ductile to brittle transition behavior. The description of anisotropic plastic behavior is needed to be able to precisely estimate strains and stresses within the structures. It is obtained by conducting various loading direction tests on smooth bars, notched axisymmetric bars and plane strain specimens. The slant ductile fracture behavior is numerically investigated by using the GTN model. The brittle fracture is studied by extending the Beremin model to brittle fracture initiation after slant ductile fracture. This study discusses the mechanism of inverse fracture during DWTT from these simulation results.

**SELLES Nathan**

**Interaction fatigue-fluage dans les polymères**

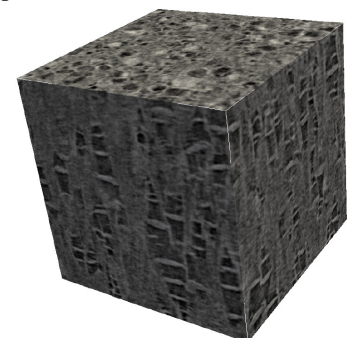
Directeur de thèse :

L.LAIARINANDRASANA

Partenaire : thèse OPEN

La durabilité des structures industrielles en polymères est un sujet de première importance actuellement, du fait de contraintes environnementales de plus en plus prépondérantes (recyclabilité, éco-conception ou allègement de structure). Les polymères présentent un comportement dépendant du temps qui doit être étudié, car ces structures industrielles sont soumises à des chargements statiques (fluage) mais aussi à de la fatigue.

L'objectif de cette étude est d'établir une « équivalence » entre des chargements de traction monotone et de fluage puis de fatigue sur un polymère semi-cristallin, le polyamide 6 (PA6). Les comparaisons se feront à l'échelle microscopique (étude des micromécanismes d'endommagement) notamment grâce à des observations en tomographie aux rayons X, et à l'échelle macroscopique (courbes de chargement et géométrie des spécimens étudiés). La modélisation par éléments finis du comportement du matériau permettra de relier le champ local de contraintes/déformations multiaxiales à la morphologie des cavités observées. Une méthodologie de calcul de durabilité des matériaux polymères en fatigue-fluage pourra alors être proposée, à travers la mise en place d'un chargement équivalent entre les trois types d'essais.



Observation en tomographie aux rayons X de la cavitation en traction monotone



## Soutenances des doctorants de 1<sup>ère</sup> année

### THEURMEL Ronan Etude de la rupture fragile des gainages en alliage de Zirconium des REP pendant la phase de tremp d'un APRP.

Directeurs de thèse : A.F GOURGUES  
LORENZON, J. BESSON  
Partenaire : EDF

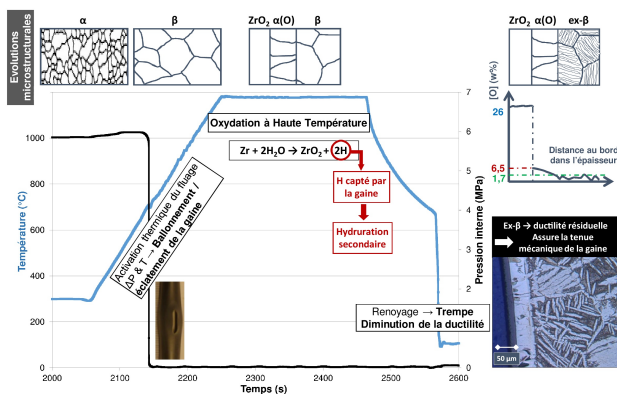


Schéma d'un transitoire APRP.

La première génération d'aciers THR, communément utilisée aujourd'hui, se compose d'une matrice ferrito-bainitique et de phases carburées (typiquement aciers DP et TRIP) et présente un très bon compromis résistance/ductilité. La seconde génération se caractérise par une matrice austénitique stable à température ambiante qui apporte des propriétés mécaniques spectaculaires (allongement supérieur à 50% et résistance mécanique de l'ordre de 1500 MPa) grâce à un maillage mécanique pendant la mise en forme (aciers TWIP). Cependant, dans ces aciers, la stabilisation de l'austénite est assurée par de fortes teneurs en C, Mn et parfois Al, les rendant onéreux et difficiles à élaborer en l'état actuel des connaissances.

La nouvelle génération à l'étude se présente comme un compromis entre la première et la deuxième génération. Composés d'une structure duplex austénite-ferrite, ces aciers possèdent 5 à 8% (en masse) de Mn et moins de 8% d'Al. Le projet ANR MeMnAl Steels (4 doctorats et 1 post-doc) vise à mieux relier les propriétés physiques de ces nouveaux aciers à leur microstructure. Plus particulièrement, ce sujet de thèse cherche à caractériser, comprendre et modéliser les mécanismes d'endommagement et de rupture de ces aciers. La première année de thèse est consacrée à l'étude et à la caractérisation mécanique de différentes nuances ayant subi différentes températures de recuit. Les nuances les plus prometteuses seront ensuite étudiées de façon plus approfondie (diversité des essais mécaniques et mode de chargement, modélisation numérique, étude de la rupture ductile, ...) durant la deuxième année. Enfin, la dernière année sera consacrée à l'établissement d'un critère d'endommagement en fonction de la microstructure considérée via le développement d'un modèle reliant microstructure et propriétés d'endommagement et de rupture.

**Sources** : les doctorants concernés

Cette thèse s'inscrit dans le contexte des études de sûreté sur le comportement des matériaux de gainage combustible en condition d'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) des réacteurs nucléaires français. Les scénarios hypothétiques d'APRP induisent des changements sévères de l'environnement thermomécanique des crayons combustibles. L'évolution de ces conditions de pression, de température et de l'état du fluide réfrigérant entraîne l'oxydation, l'hydruration et des chargements mécaniques additionnels, qui dans certains cas conduisent à la diminution du potentiel ductile des gainages combustibles. L'objectif de la thèse est d'enrichir la compréhension de l'interaction entre les différents phénomènes mis en jeu afin d'identifier un modèle scientifiquement éprouvé capable de prédire la tenue du matériau de gainage face à la tremp intervenant en fin de transitoire APRP.

Ce travail à la fois expérimental et numérique s'appuie sur des essais reproduisant les conditions APRP réalisés à l'aide d'un dispositif semi-intégral innovant et de modélisations

numériques utilisant les derniers outils de simulation développés à EDF R&D.

### TONIZZO Quentin Endommagement des aciers de troisième génération à structure duplex pour application automobile

Directeur de thèse : A.F. GOURGUES  
LORENZON

Maître de thèse : M. MAZIERE  
Partenaire : ANR Matetpro MeMnAl  
Steels (ArcelorMittal, Université de  
Lille, SIMAP Grenoble, Université  
d'Aix-Marseille, Centrale Paris)

Avec des normes nationales et européennes de plus en plus drastiques, visant à diminuer les émissions de gaz à effet de serre, et la volonté croissante de proposer des voitures moins consommatrices en essence, les constructeurs automobiles cherchent à réduire toujours plus le poids de leurs véhicules. Dans ce contexte, ArcelorMittal développe une nouvelle gamme d'aciers THR (Très Haute Résistance), dits de troisième génération, visant une résistance en traction supérieure à 1000 MPa, un allongement uniforme supérieur à 15 % pour une densité 5 à 10 % inférieure aux actuels aciers proposés aux constructeurs automobiles.

## Un mystère enfin résolu

Après presque un siècle d'études et de recherche, le mystère des trous dans certains fromages suisses, notamment l'Emmental et l'Appenzell, a enfin été percé. L'annonce a été faite ce jeudi 28 mai par l'Agroscope, l'institut des sciences en denrées alimentaires, basé à Berne.

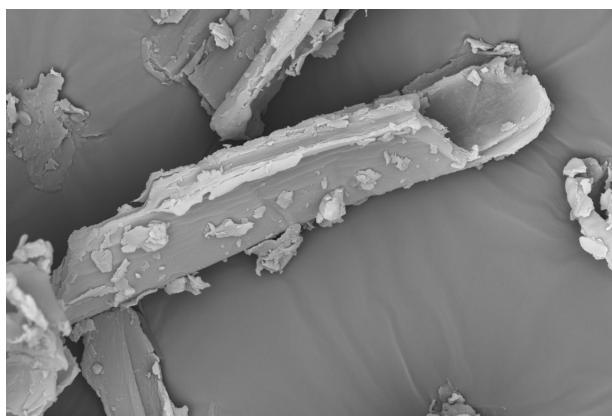
Les chercheurs d'Agroscope, associés à ceux de l'Empa (Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche), ont découvert que les "trous" sont provoqués par des petites particules de foin, qui tombent dans le lait pendant la traite des vaches. Ces particules

dégagent des gaz pendant la fermentation, qui forment alors des trous dans le fromage, a expliqué l'institut dans un communiqué. Les chercheurs ont fait cette découverte lorsqu'ils ont constaté que les trous avaient tendance à disparaître quand le lait était extrait avec des techniques plus modernes. "C'est la disparition du seuil traditionnel", placé sous le pis de la vache, et remplacé par des techniques plus modernes et plus hygiéniques, qui est à l'origine de la disparition des "trous", précise un porte-parole de Agroscope.

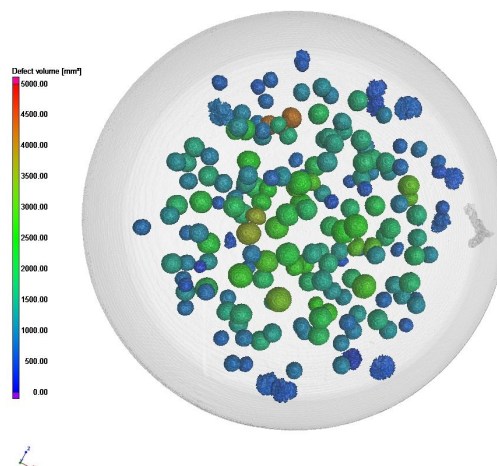
"C'est une découverte qui a été faite complètement par accident, comme toute les grandes découvertes", conclut le porte-parole d'Agroscope.

<http://www.agroscope.admin.ch/aktuell/00198/05299/05494/index.html?lang=fr&msg-id=57378>

**Sources : AFP**



(1) particule de foin avec caractéristique structurelle type



(2) image 3D par tomographie assistée par ordinateur

### La Newsletter du Centre des Matériaux

Mines Paristech - Centre des Matériaux P.M. FOURT  
ARMINES - UMR CNRS 7633  
B.P. 87  
91003 Evry cedex  
<http://www.mat.ensmp.fr>  
Téléphone : (+ 33) 1 60 76 31 40  
Télécopie : (+33) 1 60 76 31 50  
Messagerie : francoise.di\_rienzo@mines-paristech.fr

### Equipe rédactionnelle

Rédactrice en Chef : Françoise DI RIENZO  
Responsable de production : Yves BIENVENU  
La Page du CdM...Le Point ! : Odile ADAM  
Comité de relecture : F. DI RIENZO, Y. BIENVENU, O. ADAM



<http://www.mat.ensmp.fr>

Envie de publier un article sur un sujet qui vous passionne, envie de présenter un point de votre thématique de recherche, d'informer, de vulgariser ?  
Le CdM Tribune est là pour ça et vous écoute ! N'hésitez plus, écrivez.