



1	Editorial
1	Faits marquants
1	Les Douzes'Heures
2	Le point Presse
3	La matinale « Matériaux » du MatériauPôle
4-14	Les soutenances des doctorants de 1 ^{ère} année
14	ECers XIII
15	Soutenance HDR
16	Stagiaires
16	Visiteur
16	JNC18
16	ICCS17

Editorial

Effervescence de printemps au Centre des Matériaux.

Les chercheurs se dispersent aux quatre coins du monde, pour assister aux conférences qui les concernent. Certains nous envoient leurs impressions : à lire ici quelques mots sur les céramiques, composites, les matériaux et leur rôle économique et social, etc,

Les doctorants en fin de première année de thèse présentent l'avancement de leur projet de thèse devant un jury composé de tuteurs pédagogiques et industriels,

ce qui méritait bien les 10 pages centrales de ce numéro.

Les soutenances se suivent mais ne se ressemblent pas, celle de mai et la suivante, en juillet, sont des Habilitations à Diriger des Recherches. Et tradition oblige, les Douzes'Heures ont agréablement animé une des trop rares journées ensoleillées de ce printemps maussade.

Bonne lecture

Françoise DI RIENZO

FAITS MARQUANTS DE MAI - JUIN

- **04/05/2013** : CLuB ZéBuLoN
- **04/06/2013** : soutenance HDR de V. GUIPONT
- **24-25/06/2013** : soutenances des doctorants de 1^{ère} année

FAITS MARQUANTS DE JUILLET - AOUT

- **01/07/2013** : soutenance HDR de V. MAUREL
- **17/07/2013** : soutenance de thèse d'A. ANDRIEU



Les Douze'Heures 2013

Le 14 juin 2013, les Jeux Olympiques ont fait un détour par le Centre des Matériaux. Pendant 12h des équipes ont œuvré pour gagner cette compétition annuelle amicale.



Les épreuves ont débuté par un repas champêtre, réunissant une centaine de convives. Certains retraités, heureux de renouer avec leurs ex-collègues, sont venus soutenir le moral des participants. L'après-midi, des stands permettaient à chacun de participer à son rythme aux activités proposées ; de la lutte sumo, des glissades sur la piste de ventriglisse, un parcours d'obstacle incluant pêche de bouchons dans une piscine auréolée de mousse, ping-pong, volley-ball. Il y en avait pour tous les goûts. En fin d'après-midi, l'ardeur des concurrents ayant un peu baissé, les

concours ont commencé ; avions en papier fabriqués à partir de posters ratés, concours culinaire, gâteaux préparés et cuits selon des recettes tirées au sort. Un passage en douceur vers le barbecue-hamburger prévu pour le repas du soir, pour lequel on comptait encore 80 inscrits, le dessert consistant à déguster les gâteaux du concours. Toute ces épreuves ayant permis aux équipes d'accumuler des points, les médailles, en bois, illustrées du logo du Centre, ont pu être remises. Le tout sur une ambiance musicale «boite de nuit », celle ci étant maintenant tombée.

Un nouvel épisode réussi dans la saga des 12h du Centre. Merci à tous les organisateurs, doctorants de première année, stagiaires, mastères, très impliqués, soutenus comme tous les ans par une poignée de bénévoles parmi les permanents.

Sources : l'équipe des 12h, F. DI RIENZO

Revue, congrès ... le point de mai - juin

Revue à comités de lecture

TA A.T., LABED N., HOLWECK F., THIONNET Alain, PEYRAUT F., A new invariant-based method for building biomechanical behaviour laws. Application to an anisotropic hyperelastic material with two fiber families, International journal of solids and structures, 2013, 50, p. 2251-2258

HAN Xu, BESSON Jacques, FOREST Samuel, TANGUY B., BUGAT S., A yield function for single crystals containing voids, International journal of solids and structures, 2013, 50, p. 2115-2131

THOREL Alain, CISTON J., BARTEL T., SONG C., DAHMEN U., Observation of the atomic structure of beta prime - SiAlON using three generations of high resolution electron microscopes, Philosophical magazine, 2013, 93, p. 1172-1181

CHOU H.Y., BUNSELL Anthony R., MAIR G., THIONNET Alain, Effect of the loading rate on ultimate strength of composites. Application : pressure vessel slow burst test, Composite structures, 2013, 104, p. 144-153

KRAJCARZ Florent, GOURGUES LORENZON Anne Françoise, LUCAS Emmanuel, PINEAU André, Fracture toughness of the molten zone of resistance spot welds, International journal of fracture, 2013, 181, p. 209-226

BESSON Jacques, McCOWAN C.N., DREXLER E.S., Modeling flat to slant fracture transition using the computational cell methodology, Engineering fracture mechanics, 2013, 104, p. 80-95

REMY Luc, SZMYTKA F., BUCHER L., Constitutive models for bcc engineering iron alloys exposed to thermal-mechanical fatigue, International journal of fatigue, 2013, 53, p. 2-14

HELLOUIN DE MENIBUS Arthur, GUILBERT T., AUZOUX Q., TOFFOLON C., BRACHET J.C., BECHADE J.L., Hydrogen contribution to the thermal expansion of hydrided Zircaloy 4 cladding tubes, Journal of nuclear materials, 2013, 440, p. 169-177

HOLLNER S., PIOZIN Emma, MAYR P., CAES C., TOURNIE I., PINEAU André, FOURNIER B., Characterization of a boron alloyed 9CrW3CoVNbBN steel and further improvement of its high temperature mechanical properties by thermomechanical treatments, Journal of nuclear materials, 2013, 441, p. 15-23

BOUDOU J.P., TISLER J., REUTER R., THOREL Alain, CURMI P.A., JELEZKO F., WRACHTRUP J., Fluorescent nanodiamonds derived from HPHT with a size of less than 10nm, Diamond & related materials, 2013, 37, p. 80-86

KNORR I., CORDERO Nicolas, LILLEODDEN E.T., VOLKERT C.A., Mechanical behaviour of nanoscale Cu/PdSi multilayers, Acta materialia, 2013, 61, p. 4984-4995

HADDAR A., KCHAOU Y., KOSTER Alain, Numerical computation of the energetic criterion at isothermal and thermal-mechanical cyclic tests under generalized plasticity of the F17Tnb stainless steel, Engineering fracture, 2013, 181, p. 187-193

Actes de congrès

CHOU H.Y., BUNSELL Anthony, MOURITZ A., THIONNET Alain, Arguments pour expliquer la dispersion expérimentale sur le nombre de ruptures de fibres au sein d'un composite obtenue par émission acoustique, JNC 18, Nantes, 12-14 juin 2013, 10 p.

CHOU H.Y., BUNSELL Anthony, THIONNET Alain, Indicateur visuel de

l'état de fin de vie d'un réservoir composite, JNC 18, Nantes, 12-14 juin 2013, 8 p.

Brevets

THOREL Alain, CURMI P., BOUDOU J.P., JELEZKO F., Cellule photovoltaïque avec diamants fluorescents, Brevet, 2 982 423 du 10.05.13

STOYNOV Z., VLADIKOVA D., THOREL Alain, CHESNAUD Anthony, VIVIANI M., BARBUCCI A., Pile à combustible avec cathode avec canaux, Brevet, 2 982 426 du 10.05.13

Source : O. u

Divers

Le magazine "Research*eu" accorde une mention élogieuse au projet européen FP7-Energy "IDEAL-Cell", terminé depuis peu et initié par Armines, Centre des Matériaux (Alain THOREL) et coordonné par ARMINES GG et Matériaux. (Anthony CHESNAUD). Ideal cell® est une pile à combustible à oxyde solide d'un nouveau type qui propose une solution efficace pour éviter les pertes de rendement dues à la formation d'eau sur l'une des électrodes. Par ailleurs, la pile est complètement réversible et peut efficacement être couplée à une source d'énergie renouvelable pour palier l'intermittence. Les règles de fabrication sont compatibles avec les pratiques établies pour la formation de ces générateurs d'électricité fonctionnant sans impact "gaz à effet de serre". Des collaborations académiques entre les partenaires d'IDEAL-Cell sont en cours dans le but d'encore augmenter les performances de cette nouvelle pile à combustible.

Source : Y. BIENVENU.

Matinale "Matériaux" du Matériaupôle

Le Matériaupôle (www.materiaupole.org) dont le Centre des Matériaux fut l'un des membres fondateurs, a tenu, le 14 mai dernier, une matinale « Matériaux », au Musée d'Art Contemporain du Val-de-Marne, MAC/VAL, à Vitry-sur-Seine.



Cette Matinale a accueilli environ 80 participants pour une manifestation qui présente 3 parties : une présentation du Matériaupôle et de ses activités, une conférence générale sur les matériaux, et une table ronde sur l'éco-construction.

Le Président du Matériaupôle, l'adjoint au Maire de Vitry-sur-Seine vice-président de la Communauté d'agglomération Seine-Amont, des représentants du Conseil Général, ainsi que des élus de la mairie de Vitry-sur-Seine et Ivry-sur-Seine, ont présenté le Matériaupôle, ses objectifs et son importance pour l'activité du territoire de Paris Seine-Amont. En dehors des retombées économiques issues des relations du Matériaupôle avec le tissu industriel local, le Matériaupôle, sur un autre plan, contribue à faire renouer avec l'esprit « artiste-ingénieur » qui a porté le Quattrocento. Son rôle est, en effet, d'établir, au travers des questions liées aux matériaux, des ponts entre ceux qui conçoivent (grandes écoles scientifiques, institutions de recherche, bureaux d'études,...), ceux qui réalisent (entreprises industrielles) et ceux engagés dans le domaine artistique (écoles d'art, d'artisanat, de « design », architectes, artistes,...).

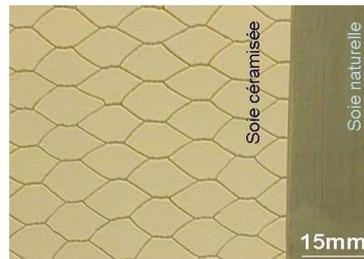
Deux projets récents du Matériaupôle ont été décrits, en guise d'illustration.

L'un a porté sur le développement des futures boîtes de bouquinistes parisiens (figure 1a) sur les des Quais de Seine où elles sont, d'ailleurs, exposées actuellement.



Boîte prototype de bouquiniste parisien

L'autre a permis la céramisation de soie de haute couture par projection thermique (figure 1b), projet dans lequel le Centre des Matériaux fut impliqué en collaboration avec l'Ecole des Arts Décoratifs (EnsAD).



Vue de dessus d'une soie naturelle revêtue par projection plasma de céramique en motif d'écaille de poisson.

La conférence qui suivait la présentation du Matériaupôle, intitulée « Que serait un monde sans matériaux », fut donnée par M. Jeandin (Centre des Matériaux). Elle avait pour simple ambition de montrer que les matériaux menaient le monde depuis toujours et le mèneront jusqu'à sa fin pour ne pas dire à sa fin. De nombreux exemples pris dans le domaine artistique illustrèrent le propos.

La table-ronde qui a succédé à la conférence, avait pour thème les enjeux pour les matériaux innovants dans l'éco-construction. Les débats ont permis de cerner les bénéfices à tirer des matériaux innovants ainsi que leurs applications dans l'éco-construction. Cette table ronde réunissait des professionnels du bâtiment (entreprises

et Fédération du Bâtiment), un représentant du Conseil Général du Val-de-Marne et un architecte. Ce dernier, Bruno Rollet, a fourni une belle illustration de l'emploi d'osier tressé pour les balcons de l'immeuble « Le Candide » (figure suivante) : tout juste achevé dans un ensemble de logements sociaux à la Cité Balzac de Vitry-sur-Seine.



Bâtiment «Le Candide» à la Cité Balzac de Vitry-sur-Seine.

Les participants auront pu profiter de l'occasion de cette Matinale pour visiter le MAC/VAL, haut lieu de l'art contemporain s'il en est. L'un des parcours artistiques au MAC/VAL s'appelle « Vivement demain ! ». Cette interjection aura souligné encore, à ses visiteurs, la convergence entre art et innovation scientifique et technique comme le soutient le Matériaupôle.

Source : M. JEANDIN

Soutenance des doctorants de 1^{ère} année

Quentin BLOCHET

Dir. de thèse : M. JEANDIN
Part. Industriel : FUI C-SAR

Influence de la morphologie de surface sur la liaison particule-surface pour un revêtement d'aluminium réalisé par projection à froid ou « cold spray »

Les alliages à base d'aluminium et de magnésium sont largement utilisés dans le secteur de l'aéronautique pour leurs propriétés spécifiques élevées. Cependant, plusieurs composants (parties moteur, ailes, pièces en rotation ...) peuvent être sérieusement endommagés, par exemple, par des impacts divers, une usure prématurée ou des phénomènes de corrosion. La réparation de ces composants est donc nécessaire, d'autant que la surface à restaurer peut être géométriquement complexe. Dans le cas où la réparation ne peut aboutir, la pièce est rebutée et remplacée, ce qui accroît considérablement les coûts. Le procédé cold spray est envisagé pour être un procédé de substitution sérieux face aux techniques de réparation existantes. Connu pour élaborer des dépôts épais (> 50 µm), la projection à froid permet l'obtention de dépôts denses possédant une forte adhérence.

Le travail de thèse s'effectue dans le cadre d'un projet FUI nommé C-SAR (« Cold Spray Advanced Repair ») impliquant plusieurs grandes compagnies de l'aéronautique Dassault Aviation, Eurocopter et EADS, ainsi que des PME, LIFCO, APS, & Trochet. Le projet C-SAR vise à développer des revêtements par cold spray dans des conditions industrielles sur composants aéronautiques afin d'améliorer le cycle de vie des pièces de série ou réparées, tout en s'inscrivant dans une logique environnementale. Suivant les sollicitations auxquelles les pièces aéronautiques sont soumises, les revêtements développés devront répondre à un cahier des charges plus ou moins contraignant.

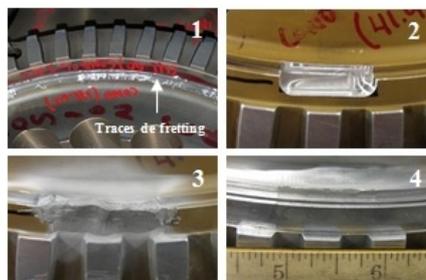
Trois objectifs principaux se distinguent suivant la fonction assurée par le revêtement :

1. Rechargement non structural : la

fonction principale réside dans l'élaboration d'un revêtement permettant de récupérer la géométrie de la pièce d'origine sur des zones peu sollicitées.

2. Rechargement structural : l'objectif est de réaliser un revêtement susceptible de passer une partie des efforts appliqués sur la pièce. On envisage l'application du procédé sur des pièces plus fortement sollicitées en réparation de zones corrodées ou présentant des traces marquées d'usure sous petits débattements.
3. Fonctionnalisation de surface : Le but dans la réalisation de ce type de revêtement est de retrouver voire améliorer les propriétés du substrat : par exemple, avec l'ajout d'une fonction tribologique, l'amélioration de la résistance à la rayure et aux impacts ou bien encore d'une fonction esthétique.

Les différentes applications présentent un niveau d'innovation variable, le développement de certaines applications ayant déjà été ancré dans le secteur aéronautique. Les applications les plus novatrices sont la mise au point de la réparation de composites à matrice métallique ainsi que la projection de magnésium, à l'heure actuelle, quasiment sans précédent.



Etapes de réparation d'un composant aéronautique endommagé (1) traces d'usure par frottement (2) usinage de l'endommagement pour conférer une géométrie simple avec rechargement (3) rechargement en aluminium (4) usinage pour redonner les dimensions originelles de la pièce, d'après P. F. Leyman & V. K. Champagne, « Cold Spray Process Development for the Reclamation of the Apache Helicopter Mast Support », August 2009.

Guillaume BURGAUD

Dir. de thèse : G. CAILLETAUD
Co-encadrants de thèse : Y. MADI, G. ROUSSELIER

Fatigue multiaxiale d'un acier pour gazoduc

Afin d'acheminer les ressources en gaz naturel depuis leur lieu d'extraction jusqu'à leur zone de consommation, d'importants réseaux de gazoducs ont été mis en place depuis les années 60 et continuent à être développés. La rupture de ces gazoducs est un problème permanent au sein de l'industrie pétrolière et chimique. Pour un tube sain de diamètre D , d'épaisseur B , ayant une résistance maximale à la traction R_m , la mécanique des matériaux donne une pression d'éclatement P_e :

$$P_e = 2 B R_m / D$$

Les gazoducs peuvent cependant être soumis à des agressions mécaniques. Lors de la pose, il peut s'agir d'un engin de chantier percutant le tube ou bien d'une irrégularité de la surface de pose qui vient le déformer. Dans les cas les plus sévères, cela conduit à la rupture du gazoduc. Dans d'autres cas, le gazoduc est simplement déformé de façon plastique, et on constate un enfoncement du tube. Dans la zone d'enfoncement, la rupture par fatigue du gazoduc sera facilitée du fait de la prédéformation plastique et de la concentration de contrainte durant l'utilisation de ce tube.

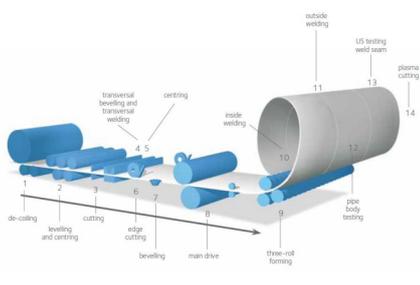
Le but final du présent travail est d'établir un critère permettant d'évaluer la durée de vie en fatigue d'une portion de tube ayant été accidentellement déformée. Ce critère devra tenir compte de la géométrie de l'enfoncement.

Durant l'étude seront pris en compte l'historique du chargement menant à l'enfoncement du tube, le couplage entre fatigue et plasticité initiale ainsi que les aspects multiaxiaux du problème de fatigue. Le présent travail s'applique à un acier à haute résistance, le X70, qui est étudié à température ambiante. Le matériau provient d'un tube de pipe-line roulé-soudé fourni par

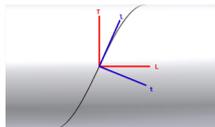
Soutenance des doctorants de 1^{ère} année (suite)

GDF. Son diamètre est de 1170mm et son épaisseur de 15mm. Le procédé de fabrication du tube de l'étude (voir figure) se décompose en deux parties. Dans un premier temps, une plaque est laminée afin d'obtenir une épaisseur constante. La plaque est ensuite mise en forme par un laminage particulier à trois rouleaux, ce qui lui confère une forme hélicoïdale. Elle est finalement soudée à l'arc électrique. L'intérêt de ce procédé est qu'il permet de fabriquer des tubes de grand diamètre et de forte longueur. Les directions de laminage et les directions principales du tubes, repérées sur le même schéma ne sont pas confondues, ce qui conduit à des chemins de prédéformation complexes et produit une anisotropie du matériau qu'il va falloir caractériser.

Production Process of Spirally Welded Pipes



Procédé de fabrication, et représentation projetée de la soudure sur le tube



Jacqueline CABALLERO

Dir. de thèse : J. CREPIN

Co-encadrant de thèse : C. DUHAMEL

Part. Industriel : EDF

Modélisation de l'amorçage de la corrosion sous contrainte en milieu primaire de l'alliage 600.

L'alliage 600 est un alliage à base de nickel ayant une excellente résistance à la corrosion en milieu aqueux à haute température. Cet alliage est utilisé dans le circuit primaire du réacteur à eau pressurisée (REP). Le retour d'expériences ainsi que les études de laboratoire ont montré que l'alliage 600

du circuit primaire est sensible à la corrosion sous contrainte (CSC). La CSC est un couplage complexe entre sollicitation mécanique, oxydation et microstructure qui affectent le comportement mécanique des matériaux pouvant conduire à l'apparition de fissures. Ces fissures peuvent être soit intergranulaires soit transgranulaires. La CSC apparaît généralement après un temps d'incubation très long, pouvant atteindre plusieurs dizaines de milliers d'heures. Cette période est suivie d'une phase d'initiation où de multiples fissures profondes se propagent très lentement.

Les points clés de la CSC sont donc le temps d'amorçage des fissures et la cinétique de fissuration rapide. Ces deux variables sont quantifiées expérimentalement en fonction des paramètres les plus influents: température et pH du milieu, microstructure et contrainte appliquée. Il est donc essentiel de disposer d'un modèle permettant de prédire le temps d'amorçage. Des études précédentes ont développé un modèle empirique basé sur des paramètres macroscopiques qui prennent en compte la contrainte, la température et la sensibilité du matériau à la CSC. Cependant, ce modèle manque de robustesse. Pour progresser dans la prédiction de la fissuration, il est nécessaire de rendre plus physiques les modèles empiriques actuels. Ainsi, il est indispensable de mieux comprendre le couplage physique à l'origine de la CSC. Donc, l'objectif principal de cette thèse est de développer un modèle local de l'amorçage des fissures sur la base des propriétés du matériau, le chargement mécanique et du milieu (température, potentiel, pH). Pour cela, il faudra: Identifier une loi de plasticité cristalline du matériau. Le but est de pouvoir

estimer les champs de déformation et de contrainte au sein des éprouvettes de laboratoire et la microstructure. Réaliser des calculs d'agrégat polycristallin pour quantifier la concentration de contraintes au niveau des joints de grains pour les différents trajets de chargement. Faire une corrélation locale entre champs mécaniques, microstructure et oxydation. Les techniques mises en œuvre seront les suivantes: EBSD (pour la caractérisation de la microstructure à l'échelle du polycristal), mesures des champs mécaniques de surface pour corrélation des images (pour quantifier la localisation de la déformation), microscopie électronique à balayage (pour l'examen des faciès de rupture par CSC), microscopie électronique en transmission (pour la caractérisation des oxydes en surface et de ceux pénétrants aux joints de grains. Le but est de proposer une interprétation des mécanismes de fissuration Pour mener à bien cette recherche, deux types de tests seront réalisés dans un milieu simulant l'eau primaire des REP:

- Essais de corrosion sous contrainte, qui seront effectués dans un autoclave. Le but est de quantifier l'impact du trajet de chargement sur le temps d'initiation de la CSC.
- Essais d'oxydation, afin de corréler la cinétique de fragilisation des joints de grains à des paramètres microstructuraux locaux.

Elizabeth CHAUMUN

Dir. de thèse : J. CREPIN

Co-encadrant de thèse : M. SENNOUR

Part. Industriel : CEA

Corrosion sous contrainte de soudures à base de nickel : influence des paramètres microstructuraux

La Corrosion Sous Contrainte (CSC) est un des principaux phénomènes de dégradation des alliages à base de

Soutenance des doctorants de 1^{ère} année (suite)

nickel utilisés dans les Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) en France. Le nombre de cas de fissurations de soudures à base de nickel dans le circuit primaire des REP a significativement augmenté depuis les années 90. Seuls 3 cas concernent l'Alliage 82 (A82) qui fait l'objet de cette étude.

Dans ce contexte, l'objectif est d'étudier le comportement à l'amorçage en CSC de l'Alliage 82 et, notamment, l'influence des paramètres microstructuraux. Pour cela, des essais d'amorçage ont été effectués en autoclave en milieu vapeur d'eau hydrogénée à 400°C. La caractérisation des éprouvettes en surface est effectuée par Microscope Electronique à Balayage (MEB) et la microstructure est analysée par EBSD (Electron Back-Scatter Diffraction).

Les paramètres étudiés sont l'influence de la teneur en chrome et du procédé de soudage, de l'état métallurgique, de la morphologie des grains et de l'état de déformation (mesurée par corrélation d'images de micro-grilles) sur la localisation des fissures de CSC. La corrélation des trois axes d'étude : la microstructure / le comportement micromécanique local / la localisation des sites d'amorçage de fissure en CSC, vont permettre de déterminer, s'il y en a, des paramètres microstructuraux favorisant l'amorçage de fissures en CSC.

Sylvain DEPINOY

Dir. de thèse : A.-F. GOURGUES

Co-encadrant de thèse : C. TOFFOLON

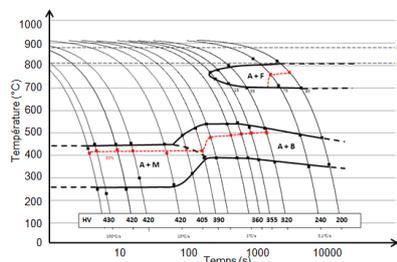
Part. Industriel : CEA

Etude de l'Influence de la microstructure sur l'évolution des propriétés mécaniques d'aciers bainitiques 2 ¼ Cr-1Mo

Les réacteurs à eau légère ou REL (à eau sous pression, REP ou à eau bouillante, REB) représentent 80% du parc nucléaire mondial. Etant la solution de référence pour le renouvellement du parc nucléaire français, les REP seront en activité en France au moins jusqu'à la fin du 21e siècle. Ils cohabiteront donc avec les réacteurs de 4e génération. Au niveau

international, les réacteurs à eau légère de 2e génération devraient également être remplacés par des REP ou des REB, au moins jusqu'en 2050. La sécurité et la compétitivité technologique des REL représentent donc un enjeu stratégique majeur.

L'acier bainitique 2¼Cr – 1 Mo est connu pour présenter de bonnes propriétés mécaniques (résistance, ductilité et ténacité), ce qui en fait un candidat potentiel pour la fabrication de pièces épaisses entrant dans la composition des REL. Lors de leur fabrication, ces pièces subissent de nombreux traitements thermiques : austénitisation, trempes et revenus. Les conditions de ces traitements thermiques (temps, température) ont une influence très importante sur la microstructure et les propriétés en service de l'acier. Le but de cette thèse est de contribuer à l'optimisation des propriétés mécaniques de l'acier 2¼Cr – 1 Mo en contrôlant sa microstructure par le biais des traitements thermiques.



Transformations au refroidissement
d'un acier 2 ¼ Cr-1 Mo

Maya GEAGEA

Dir. de thèse : A. THOREL

Co-encadrant de thèse : A. CHESNAUD

Nouvelles architectures de surfaces d'échange : application aux composants multicouches avancés pour l'amélioration de l'efficacité énergétique (électrodes de pile à combustible, électrolyseurs).

François-Xavier HOCHÉ

Dir. de thèse : L. REMY

Co-encadrants de thèse : A. KOSTER,

L. NAZE

Part. Industriel : PSA

Prise en compte du vieillissement en service dans le dimensionnement en fatigue thermo-mécanique de culasses en alliages d'aluminium.

Les culasses de moteur diesel PSA sont fabriquées à partir d'alliages d'aluminium de fonderie à haute teneur en silicium. Les raisons du choix d'un tel alliage sont multiples : faible densité, bonne coulabilité ainsi qu'une très bonne conductivité thermique. Afin de réduire au maximum les contraintes thermiques, la culasse du moteur diesel est parcourue par un système de refroidissement. Bien que, la culasse atteigne rapidement une température stable lors de l'utilisation du véhicule, la succession de démarrages et d'arrêts sollicite fortement la culasse. L'étude des propriétés en fatigue thermo-mécanique des différents alliages utilisés pour la réalisation de la culasse devient donc nécessaire afin de mieux évaluer la durée de vie d'une culasse.

Ces contraintes thermo-mécaniques ont tendance à devenir de plus en plus importantes avec la mise en place de nouvelles techniques telles que le downsizing (réduction d'encombrement à iso-puissance) mais également avec les nouvelles normes européennes sur les rejets de particules et gaz polluants. Les performances des alliages utilisés auparavant n'étant plus suffisantes pour répondre à ces normes, ceux-ci doivent être remplacés par des nuances présentant des caractéristiques mécaniques mieux adaptées à ces objectifs. Une tendance actuelle est l'augmentation de la concentration en Cu qui se traduit par une meilleure stabilisation des phases précipitées et donc une meilleure conservation des propriétés mécaniques à hautes températures. Cette thèse a pour objectif l'étude de deux compositions d'alliage d'aluminium.

L'analyse de la microstructure de précipitation, c'est à dire la détermination de la nature des phases

Soutenance des doctorants de 1^{ère} année (suite)

précipitées et de leurs distributions, sera réalisée en Microscopie Electronique en Transmission. Une cartographie de la précipitation en fonction des paramètres des traitements thermiques sera donc réalisée et permettra de décrire l'évolution de la microstructure de précipitation lors du vieillissement de la culasse. Une analyse de l'effet de chargements thermiques anisothermes sur la cinétique de précipitation permettra de corrélérer l'étude réalisée sur la base de traitements isothermes aux conditions réelles d'utilisation de ces alliages.

Une campagne d'essai sera réalisée afin de comprendre le comportement cyclique viscoplastique des deux matériaux dans différentes conditions de traitements thermiques. Deux types d'essais sont prévus durant cette étude : essai d'érouissage cyclique et essai de traction. Ces essais seront réalisés à température ambiante, à 200 et à 250°C. Ces essais serviront de base expérimentale afin de pouvoir identifier la loi de comportement puis au final l'implémenter.

Les relations entre la déformation plastique et la cinétique de précipitation seront également étudiées au moyen d'essais thermomécaniques anisothermes. Les mêmes chargements thermiques anisothermes que ceux utilisés lors de l'étude de la cinétique de précipitation seront appliqués afin de préciser l'effet de la plasticité sur cette cinétique de précipitation.

A partir des résultats de cette partie expérimentale, nous allons pouvoir raffiner la loi de comportement du matériau. Cette loi de comportement doit être implémentée en calcul de structures avec une procédure adaptée pour gérer l'effet de la température de fonctionnement et sa distribution selon la zone de la culasse considérée, afin de pouvoir simuler la durée de vie d'une culasse d'un moteur diesel.



tablature brute de culasse

Vincent MACDONALD

Dir. de thèse : J. CREPIN

Co-encadrant de thèse : Q. AUZOUX

Part. Industriel : CEA

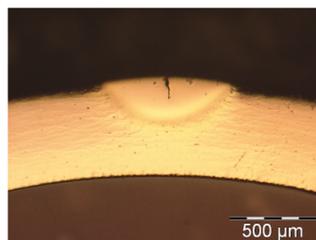
Rupture des gaines combustibles en situation accidentelle de type RIA : étude expérimentale et modélisation

Les matériaux de gainage du combustible utilisés dans les Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) du parc français sont des alliages de zirconium. En conditions normales de fonctionnement, la gaine s'oxyde, une couche de zircone ZrO_2 se forme à l'interface eau/gainage, et une partie des atomes d'hydrogène issus de la réaction d'oxydation diffusent dans la matrice sous

forme de solution solide, puis peuvent précipiter si la teneur dépasse la limite de solubilité pour former des hydrures de zirconium. A partir d'une certaine épaisseur, la zircone peut localement s'écailler et ainsi créer un gradient thermique dans la gaine, du fait de la moins bonne conductivité de l'oxyde par rapport à la matrice de Zircaloy-4. L'hydrogène peut alors diffuser vers le point froid, et précipiter pour former ainsi une zone lenticulaire fragile appelée « blister » d'hydrures.

Le "Reactivity Initiated Accident" ou « RIA » est un scénario d'accident qui suppose une augmentation brutale et incontrôlée de la réactivité du réacteur à eau pressurisée (REP).

L'objectif de la présente thèse est de développer et de valider un outil numérique de prédiction de rupture, ou non, des gaines lors d'un RIA, prenant en compte la présence éventuelle d'un blister d'hydrures et de sa géométrie, des niveaux d'irradiation et d'hydruration de la gaine et des paramètres du pulse RIA.



Blister d'hydrures formé en laboratoire sur une gaine de Zircaloy-4 déténué.

Arina MARCHENKO

Dir. de thèse : S. FOREST

Co-encadrant de thèse : M. MAZIERE

Part. Industriel : ANR Fluti

La modélisation du vieillissement statique et dynamique dans le titane polycristallin non allié

Le fluage de titane à température ambiante conduit à une réduction de la résistance et provoque le phénomène de rupture différée lors d'essais de fluage sur éprouvettes entaillées. Plusieurs études montrent que la présence des atomes interstitiels comme l'hydrogène et l'oxygène provoque l'apparition des phénomènes de vieillissement statique et dynamique à cause de l'ancrage des dislocations par des atomes interstitiels.

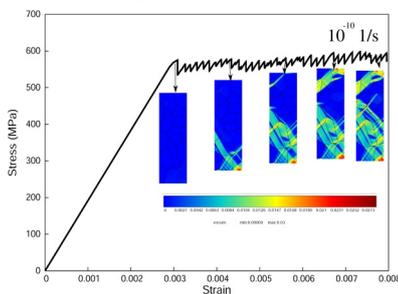
Pour analyser et préciser l'origine et l'influence de ces phénomènes sur le comportement viscoplastique à température ambiante en présence d'hydrogène et d'oxygène, une étude expérimentale et numérique multi-échelle est lancée sur du titane non-allié de phase alpha.

L'apparition du vieillissement statique qui provoque des instabilités mécaniques de type Piobert-Lüders est observée lors des essais de traction pour certains angles de prélèvement. Lorsque la traction s'exerce en sens travers de la tôle, un crochet marqué apparaît sur la courbe, suivi par un palier de Lüders. On attribue la présence de ce crochet à la ségrégation des impuretés sur les dislocations coin à composante $\langle c \rangle$. Dans le cas du titane non-allié, c'est l'oxygène qui joue un rôle principal et qui donne naissance au phénomène de vieillissement statique à température ambiante. On observe aussi du vieillissement dynamique qui se manifeste par de discrètes serrations sur la courbe de traction avec sauts de vitesse. On associe les instabilités observées à la dissociation des cœurs de dislocations vis de vecteur de Burgers $\langle a \rangle$.

La simulation par éléments finis du comportement élasto-viscoplastique de microstructures mono et polycristalline permet de modéliser la formation et la propagation des bandes de Lüders. Le modèle de vieillissement

Soutenance des doctorants de 1^{ère} année (suite)

utilisé, initialement proposé par McCormick, est basé sur une variable interne ta appelée «temps de vieillissement» et il est introduit dans un modèle polycristalline standard. Les résultats numériques indiquent la formation des bandes au sein de l'éprouvette lorsque les systèmes de glissement pyramidaux de type $\langle c+a \rangle$ sont activés. Un modèle permet aussi simuler le vieillissement dynamique (voir figure).



Guillaume MARION

Dir. de thèse : G. CAILLETAUD
Co-encadrants de thèse : C. COLIN,
M. MAZIERE
Part. Industriel : Pôle Comp.
« FALAFEL »

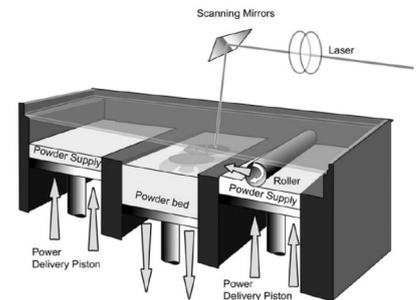
Modélisation de procédés de fabrication directe de pièces aéronautiques et spatiale en TA6V par projection et fusion sélective d'un lit de poudre par laser : approche thermique, métallurgique et mécanique

The FALAFEL consortium (Additive Manufacturing with Laser or Electron Beams) which includes French aeronautical companies and academic laboratories, has been created to improve two innovative processes called Direct laser deposition (DMD) and Selective laser melting (SLM), which allow near net shape part manufacturing directly from computer aided design data. These processes offer greater opportunities of important mass gains by optimizing the design of aircraft structures, which is a major focus of the aviation industry. However, local variations of temperature during manufacturing

produce heterogeneous microstructures and residual stress. In order to improve the understanding of the processes and to predict the residual stress and strain in the manufactured parts, finite element models of the processes need to be developed. The material considered here is Ti-6Al-4V. As is well known in the literature, this allows performing a macroscopic modeling of the process.

Arnaud LONGUET implemented a model of a 2D wall, built using the DMD process, including thermal evolution, phase transformations and mechanical analysis. The thermal simulation, which is an input for the coupled metallurgical and mechanical parts of the model, has been successfully calibrated by means of thermocouple measurements. The next step will be to model a 3D massive part, in order to study the influence of the different building strategies on the distribution of residual stress in bulk material.

The experience earned from the DMD modeling will help to implement a model of the SLM process but there are some difficulties to be taken into account. The main difference is that the material is not added but already present in a powder layer. Thus, the lateral faces are not in contact with air as in the DMD process but with the powder bed, and the temperature field can only be observed on the surface and not inside the powder bed. So the thermal conductivity and porosity of the powder bed need to be correctly defined. Another important difference is the scale. As the SLM rows are much thinner than DMD ones, using the same local modeling strategy of the process will quickly conduct to important calculation times. It will be important to find a modeling strategy that allows a good compromise between the calculation time and the size of the part to build.



Example of an additive manufacturing process : Selective Laser Melting. At each iteration, a new powder layer is deposited and locally melted with a laser beam to build the part.

David MASSON

Dir. de thèse : A. Thorel
Co-encadrant de thèse : A. Chesnaud
Contribution au développement d'une nouvelle architecture de pile à combustible de type SOFC à anode support pour l'amélioration des performances et de la durabilité des cellules

Mon travail de thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet Européen (acronyme : EVOLVE) financé par la plateforme technologique FCH-JTI (Fuel Cells and Hydrogen Joint Technology Initiative) du 7^{ème} Programme Cadre Recherche et Développement (FP7, 2007-2013) administré par l'Union Européenne (UE). Ce projet fédère un consortium européen de 9 partenaires pour une durée totale de 4 ans. L'objectif de ma thèse repose sur le développement et l'optimisation d'une nouvelle génération de pile à combustible de type SOFC à anode support architecturée, basée sur un empilement stratégique des matériaux opérationnels : augmenter la performance de ce type de dispositif permettrait de réduire la température de fonctionnement et par conséquent d'améliorer leur durée de vie. Même si la faisabilité et la potentialité des piles à combustible de type SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) ont depuis longtemps été prouvées, le retardement répété de leur commercialisation démontre l'existence de verrous scientifiques et technologiques qu'il est impératif de lever, tels que une dégradation accélérée en cyclage redox

Soutenance des doctorants de 1^{ère} année (suite)

à haute température et un coût de fabrication encore trop élevé. Ainsi, un abaissement de la température de fonctionnement des SOFC permettrait de minimiser ces deux inconvénients, en y intégrant des matériaux opérationnels, habilités à répondre à des contraintes mécaniques et chimiques en cycles thermiques (à l'origine des problèmes de durabilité), et des plaques bi-polaires en alliage métallique, moins coûteuses, pour le collectage de courant. L'intégration de nouvelles architectures pour les composants, combinée à l'usage de matériaux avancés opérationnelles, est une voie privilégiée pour abaisser la température de fonctionnement des dispositifs SOFC. Cette démarche est proposée dans le cadre de ce projet visant le développement et l'optimisation d'une cellule à anode support (AS-SOFC) à architecture innovante pour un fonctionnement optimal attendu aux alentours de 750 °C. Ce dispositif est conçu pour allier les avantages d'une cellule à électrolyte support (ES-SOFC), la robustesse et la flexibilité, à celui d'une cellule à anode support (AS-SOFC), la puissance électrique fournie, en y adjoignant la stabilité électrochimique en cycle redox d'une technologie à support métallique (MS-SOFC). La conjonction de ces atouts permettrait ainsi de répondre aux impératifs de fiabilité et durabilité en regard des performances déjà existantes pour les dispositifs SOFC.

L'originalité de la cellule EVOLVE repose sur la combinaison d'un collecteur de courant innovant (mousse d'alliage métallique imprégnée d'une céramique conductrice mixte, ionique et électronique), non sensible à l'oxydation, et assurant l'intégration mécanique du système multicouches, et d'une anode composite fonctionnelle (figure 1) flexible aux hydrocarbures et à H₂S. Une telle anode support bi-composants, dépourvue de particules de nickel et à fonctionnalités découplées, est donc une solution incontournable qui permettrait d'améliorer la fiabilité et la durée de vie (estimée en % de dégradation électrochimique par kh de fonctionnement) des piles SOFC

(50,000 heures), ainsi que leurs tolérances au soufre (> 80 ppm).

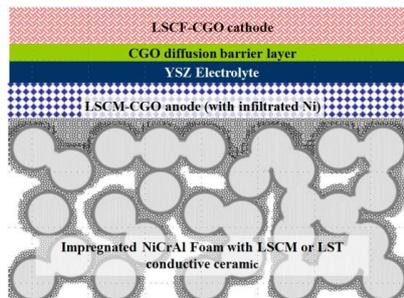


Schéma de la cellule EVOLVE illustrant l'empilement des différentes couches fonctionnelles.

David MOREAU

Dir. de thèse : S. CANTOURNET

Co-encadrant de thèse : L. CORTE

Part. Industriel : EPA

Conception de composites hydrogel-céramique pour l'implantologie

Cette thèse a pour objectifs l'élaboration et la caractérisation de matériaux composites destinés à favoriser le processus d'intégration osseuse à l'interface entre un os et un implant tissulaire et à renforcer l'ancrage de ces implants.

L'accroissement du nombre de blessures du système ostéo-articulaire est un problème de santé majeur. Les tissus mous concernés, tels que le cartilage, les tendons, et les ligaments, sont très peu vascularisés et cicatrisent très difficilement. Par conséquent, leur reconstruction nécessite une intervention extérieure, qui consiste en un remplacement du tissu mou par une greffe naturelle, mais qui entraîne certaines limitations. C'est pourquoi des systèmes synthétiques sont développés depuis plus de 30 ans. Un des obstacles majeurs à franchir pour ces systèmes alternatifs est celui de l'ancrage de l'implant aux tissus osseux.

Ce travail de doctorat propose de développer de nouveaux systèmes à base de composites d'hydrogel d'alcool polyvinylique et de particules d'hydroxyapatite, destinés à favoriser et renforcer l'ancrage d'implants de tissus mous au contact du tissu osseux. Les hydrogels sont des réseaux de chaînes

de polymères hydrophiles réticulés et gonflés dans l'eau. Ces réseaux hydratés sont des solides élastiques souples qui présentent des comportements mécaniques similaires aux tissus conjonctifs. Les hydrogels choisis pour l'étude sont des hydrogels de polyalcool vinylique (PVA) qui sont des matériaux biocompatibles, non résorbables et déjà utilisés dans des applications biomédicales, comme les implants de cartilage. L'hydroxyapatite est un matériau minéral phosphocalcique de composition similaire à la composante minérale osseuse. C'est un matériau bioactif, qui est largement employé dans les applications biomédicales, comme substitut osseux ou comme matériau de recouvrement pour les prothèses métalliques. Il est utilisé pour ses propriétés ostéoconductrices, favorisant la croissance de l'os et l'ostéo-intégration.

Les travaux de ce projet de thèse sont directement appliqués à de nouveaux implants ligamentaires en fibres d'hydrogel de PVA développé par le Centre des Matériaux et l'université de GeorgiaTech (Atlanta, GA, Etats-Unis). L'objectif principal est l'élaboration de revêtement pour l'ancrage de ces implants dans les tunnels osseux. La réalisation de ces revêtements composites passe par un choix judicieux des compositions et des paramètres du procédé de fabrication. Ces paramètres vont être caractérisés et quantifiés par des essais mécaniques in situ en milieu aqueux, et des observations microscopiques en condition hydratée à l'aide de différents moyens (optique, MEB, tomographie, et confocale). Enfin grâce à une collaboration avec un laboratoire de biologie, le B2OA, de l'université Paris-Diderot, ces revêtements seront testés in vivo, afin de valider leur biocompatibilité et leur ostéoconductivité.

Soutenance des doctorants de 1^{ère} année (suite)

Erembert NIZERY

Dir. de thèse : S. FOREST

Co-encadrant de thèse : H.

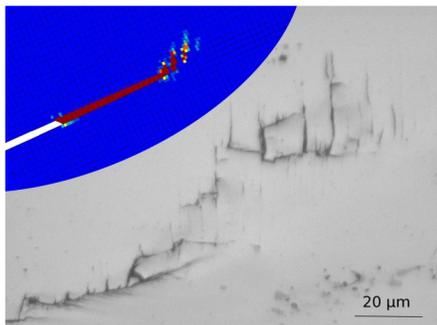
PROUDHON

Part. Industriel : CONSTELLIUM

Etude expérimentale et numérique de la fatigue des alliages Al-Cu-Li

Les nouveaux alliages aluminium-cuivre-lithium AIRWARE[®], développés dans un but d'allègement des structures aéronautiques, présentent des caractéristiques mécaniques accrues et une densité plus faible. L'investissement dans une fonderie à Issoire ainsi qu'au Centre de Recherches de Voreppe attestent de la réussite industrielle de ces alliages. La résistance à la fatigue, bien qu'accrue dans ces alliages, est encore un facteur dimensionnant pour certaines pièces. Parallèlement à un travail sur la géométrie et l'assemblage des pièces, l'amélioration des propriétés intrinsèques du matériau reste une voie à étudier. Ce dernier point est à l'origine du travail de thèse.

L'approche de la thèse consiste à comparer un alliage conventionnel (7050-T7451) avec un alliage aluminium-cuivre-lithium (2050-T8), dans le but d'identifier les paramètres qui confèrent ses propriétés accrues au nouvel alliage.



(a) Effet de la cristallographie sur la propagation d'une fissure de fatigue (microscopie optique - alliage Al-Cu-Li), (b) Simulation de propagation de fissure prenant en compte l'orientation cristallographique locale (ZéBuLoN).

Une première partie expérimentale a pour objectif de caractériser les matériaux et d'identifier des mécanismes de fissuration. La seconde partie, numérique, consistera à réaliser

des études paramétriques à l'aide du code de calcul ZéBuLoN, en adaptant la loi de propagation de fissure basée sur le cumul d'endommagement et qui prend en compte la plasticité cristalline.

Antoine OGER

Dir. de thèse : J. CREPIN

Part. Industriel : Nexter Systems

Modélisation du comportement thermo-mécanique d'un tube d'arme au passage d'un projectile.

L'érosion ainsi que la durée de vie d'un tube d'arme, peuvent être définies comme la dégradation progressive de l'âme du tube ainsi que son élargissement durant un tir ou une séquence de tir. Il en résulte une perte de vitesse du projectile en sortie de tube, une diminution de la portée utile de combat, une perte de précision et donc de l'efficacité globale de l'arme. Ce comportement est typique de l'évolution d'un tube d'arme soumis à des cycles comportant des impulsions thermiques, corrosions chimiques et dégradations mécaniques.

L'étude vise à déterminer le comportement thermo-mécanique d'un tube d'arme lors d'un tir ou d'une séquence de tir. Les effets thermo-mécaniques auxquels est soumis le tube engendrent des contraintes très élevées résultant de l'association du passage du projectile et de la combustion de l'agent propulsif. En effet, la mise à feu du projectile engendre une forte augmentation de la pression, d'une durée de quelques millisecondes, associée à un flash thermique violent. Le cycle thermique induit un gradient important de température au niveau de la peau interne (composée dans la plupart des cas d'un matériau bicouche constitué d'un acier et d'une couche protectrice de chrome ou de nituration). Ce gradient thermique induit un différentiel de dilatation au sein de la structure engendrant des fortes contraintes thermo-mécaniques, bien au-dessus des contraintes engendrées par la seule pression des gaz, et pouvant dépasser largement la

limite élastique des matériaux constituant le bicouche. Le flash thermique provoque donc un cyclage mécanique sur quelques dixièmes de millimètres que le matériau peut accommoder uniquement durant quelques cycles avant l'apparition d'une fissure. On est donc en présence de matériaux soumis à une fatigue oligocyclique sous chargement thermo-mécanique extrême.

La première étape de l'étude concerne l'analyse du comportement en température des matériaux constituant la structure sur une large gamme (0°C – 1200°C) afin de déterminer l'évolution des propriétés des matériaux (module d'élasticité, conduction thermique, chaleur spécifique...).



Instrumentations d'un tube de 30 mm avec des jauges de déformations circonférentielle [Nexter Systems]



Ensuite, une approche par simulation numérique à l'aide du logiciel LS-DYNA sera effectuée afin de coupler les phénomènes thermiques et mécaniques. Cette analyse sera réalisée grâce à la plateforme MECCAD (Modélisation des Echanges de Chaleur pour les tirs en CADence) développée par Nexter. Ce logiciel permet de calculer en 1D les transferts de chaleurs à l'intérieur du canon (balistique intérieure, transfert de chaleur dans la couche limite, détente des gaz...). Pour calibrer le calcul, des essais de tirs instrumentés ont été menés afin de recaler au plus juste les résultats numériques. Ces essais ont pour objectif de pouvoir recaler mécaniquement et thermiquement le modèle, c'est à dire d'ajuster les paramètres de la ceinture

Soutenance des doctorants de 1^{ère} année (suite)

(caractéristiques matériaux, coefficient de friction ...) et de déterminer la loi de détente des gaz par exemple. Le but final de la modélisation étant de disposer d'un modèle fiable, le plus représentatif de la réalité, permettant ainsi d'établir le degré d'importance des phénomènes mis en jeu du point de vue de la durabilité du tube et à terme d'améliorer la prédiction de durée de vie.

Notons que les aspects chimiques et autres phénomènes tel que l'arrachement de matière ne seront pour le moment pas pris en compte dans l'étude.

Georges PEYRE

Dir. de thèse : D. RYCKELYNCK
Part. Industriel : ONERA
Approche Hr^2

Hubert SALMON-LEGAGNEUR

Dir. de thèse : A.-F. GOURGUES
Co-encadrants de thèse : J. GARNIER,
S. VINCENT
Part. Industriel : CEA

Caractérisation et modélisation de l'endommagement à haute température d'aciers ferritiques renforcés par dispersion de nano-oxydes (ODS)

Clément SORET

Dir. de thèse : J. BESSON
Co-encadrant de thèse : Y. MADI
Part. Industriel : TOTAL
Conception de pipelines basée sur des critères en déformation dans des conditions de froid extrême.

Les besoins toujours grandissants en énergies fossiles poussent les compagnies pétrolières à exploiter les gisements dans des conditions de plus en plus sévères. TOTAL a notamment lancé de nombreux projets dans des zones arctiques, dans lesquelles d'importants mouvements de terrains peuvent avoir lieu (affaissement par fonte du pergélisol, soulèvements par gel du sol, dragage du sol par passage

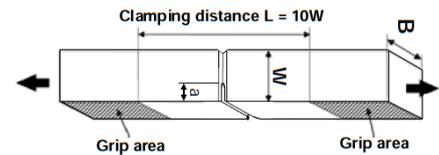
d'iceberg, ... etc.). Le déplacement de ces sols peut induire de hauts niveaux de déformations plastiques pouvant atteindre plusieurs pourcents aux pipes qui y sont enfouis (voir figure 1). De plus, les faibles températures rencontrées dans les zones arctiques sont un véritable handicapant pour le dimensionnement des tubes en acier. En effet, pour des températures avoisinantes les -60°C , le risque est d'avoir un matériau au comportement fragile. Dans ces conditions, lorsque le pipe est soumis à des déformations plastiques, l'approche traditionnelle « Stress-Based Design » n'est plus applicable, car elle n'autorise pas de déformations plastiques supérieures à 0.5 %. Une nouvelle approche est alors proposée ; on parle de « Strain-Based Design ». Par ce type d'approche, on souhaite vérifier que le tube de pipeline (en zone de métal de base et de soudure) peut accepter un certain niveau de déformation plastique. Cette thèse s'intéressera particulièrement au critère d'acceptabilité de défauts dans les cordons de soudures.

Un premier temps de la thèse sera consacrée à l'étude critique des modèles SNBD existants, particulièrement ceux proposés par le BS7910, ExxonMobil ou encore PRCI, notamment en ce qui concerne les essais de la mécanique de la rupture SENT qui seront un point essentiel de cette thèse.

Dans un second temps, deux pipes (X65 seamless et X70 LSAW) seront caractérisés dans leur partie métal de base et zone de soudure, en terme de loi de comportement et de mécanique de la rupture. Une importante campagne expérimentale est prévue à température ambiante et à basses températures. Différents essais SENT seront notamment réalisés.

Enfin, une troisième partie de la thèse sera dédiée au développement d'un critère d'acceptabilité des défauts basé sur une approche locale. En effet, un aspect particulièrement limitant des approches globales existantes est l'hypothèse de transférabilité totale entre éprouvettes de laboratoire et structure réelle. Le recours à des modèles d'endommagement locaux

permettrait alors de s'affranchir de cette problématique de transférabilité.



Calculs des déformations plastiques cumulées dans un pipeline on-shore

Isabelle TURQUE

Dir. de thèse : J. CREPIN
Co-encadrants de thèse : M. LE SAUX,
J.-C. BRACHET
Part. Industriel : CEA
Effet de fortes teneurs en hydrogène sur la microstructure et le comportement mécanique de gaines en alliages de zirconium du combustible des réacteurs à eau pressurisée oxydées à haute température.

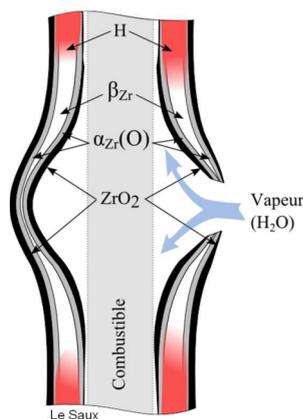
Les alliages de zirconium sont utilisés comme matériau de gainage du combustible des Réacteurs à Eau Pressurisée. Dans des conditions hypothétiques d'Accident par Perte de Réfrigérant Primaire (APRP), la gaine subit une montée en température (jusqu'à 1200°C) ce qui induit son ballonnement pouvant aller jusqu'à son éclatement. La gaine soumise à la vapeur d'eau à haute température s'oxyde relativement rapidement, avant la mise en route du système de refroidissement d'urgence. Cette dernière étape conduit à un refroidissement progressif puis à une trempe à l'eau de la gaine.

Dans certaines conditions (environnement confiné à l'intérieur de zones ballonnées-éclatées lors d'un APRP), il peut survenir au cours du transitoire une prise massive d'hydrogène, hétérogène axialement et azimutalement, pouvant aller jusqu'à plusieurs milliers de ppm massiques localement (plus de 3000 ppm-mass.). L'oxygène et l'hydrogène absorbés induisent une fragilisation de la gaine, dont il faut vérifier la tenue mécanique au choc thermique, conséquence du renoyage final du cœur, et la ductilité résiduelle « post-trempe ». Jusqu'à

Soutenance des doctorants de 1^{ère} année (suite)

maintenant les études se sont principalement concentrées sur l'effet de l'hydrogène à des concentrations représentatives de celles obtenues en fin de vie en conditions normales de fonctionnement (par exemple, ~600ppm-mass. pour le Zircaloy-4 et moins de 150 ppm-mass. pour le M5TM). L'objectif de la thèse est d'étudier la microstructure et le comportement mécanique pendant et après le refroidissement et la trempe de deux alliages de zirconium, le Zircaloy-4 et le M5TM, contenant de très fortes teneurs en hydrogène (de 1000 à au moins 3000 ppm-mass.). L'influence du scénario de refroidissement avant trempe (vitesse de refroidissement avant la trempe et température depuis laquelle s'effectue la trempe) sera également investiguée.

Le but final sera d'apporter les éléments qui permettront de modéliser le comportement mécanique de la gaine au cours du refroidissement et de la trempe, en tenant compte des gradients de concentration en oxygène et hydrogène, ainsi que de la géométrie complexe de la gaine résultant de son ballonnement et de son éclatement (cf. figure ci-dessous).



Pierre-Louis VALDENAIRE

Dir. de thèse : S. FOREST

Co-encadrant de thèse : M. FINEL

Part. Industriel : ONERA

Couplage champs de phase et densités de dislocations

Les alliages métalliques utilisés comme matériaux de structure sont des alliages multiphasés et l'arrangement spatial de

ces phases, appelé microstructure, est à l'origine du comportement mécanique du matériau. Bien souvent, comme c'est le cas pour les superalliages aéronautiques, la microstructure est issue d'une transformation de phase.

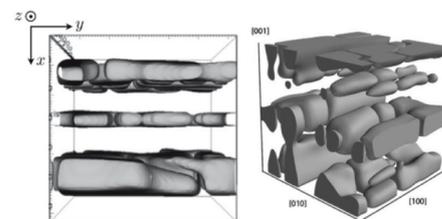
En service, le matériau subit des sollicitations thermiques et mécaniques qui conduisent à une modification de la microstructure, ainsi qu'à la formation et à la propagation de défauts tels que les dislocations. Ces phénomènes sont très complexes puisque la création et l'évolution des dislocations sont très sensibles à la microstructure, et que, simultanément, l'évolution de la microstructure est influencée par la présence des dislocations. Toutes ces modifications entraînent une dégradation des propriétés mécaniques du matériau et limitent sa durée de vie.

Un axe de recherche développé depuis plusieurs années est l'étude du couplage entre l'évolution microstructurale et la plasticité. Le LEM travaille activement à simuler la vie de ces microstructures, notamment à l'aide de l'outil champ de phase, permettant une bonne description thermodynamique d'un milieu hétérogène. La plasticité, quant à elle, joue un rôle important dans l'évolution de cette microstructure en modifiant la forme ou encore l'arrangement des précipités. Cette plasticité a déjà été prise en compte à l'Onera, notamment pour mettre en évidence les phénomènes de mise en radeau dans les superalliages monocristallins, puis en prenant en compte les effets de longueurs internes dans les lois de comportement plastique. Cependant, les modèles de plasticité actuellement couplés à la méthode des champs de phases sont des modèles phénoménologiques découlant de la mécanique des milieux continus. Ces modèles sont incapables de reproduire finement le comportement de l'activité plastique au travers les interfaces qui délimitent les différentes phases. La raison en est que ces champs ne permettent pas de quantifier sans ambiguïté la présence de dislocations à proximité des interfaces. Par ailleurs, la prise en compte des effets de confinement par l'intermédiaire d'un

terme en gradient de déformation reste très phénoménologique et nécessite en particulier l'identification d'un préfacteur par calibration sur des résultats expérimentaux, ce qui laisse obscure la véritable nature physique de ce terme.

Afin de décrire plus fidèlement la plasticité, il est intéressant de développer un modèle rattaché à l'origine physique de la plasticité, les dislocations. Ces dernières décennies ont vu arriver la formulation d'équations maniant des densités de dislocations. En particulier, I. Groma et ces collaborateurs ont récemment dérivé les équations d'évolutions des densités de dislocations à partir des équations d'évolution de dislocations individuelles. Même si ce changement d'échelle, basé sur les outils de la physique statistique, est pour le moment limité à une situation bidimensionnelle, il ouvre la voie au développement de modèles avec moins de phénoménologie, couplant évolutions microstructurales et activités plastiques.

Ma thèse consiste à développer un modèle de ce type afin de le coupler à un modèle de champs de phase. L'objectif est de mieux comprendre l'influence de la plasticité sur une microstructure évolutive en se basant sur cette nouvelle formulation. Cela permettra d'établir précisément les avantages et les inconvénients du modèle proposé par I. Groma par rapport aux autres formalismes traditionnellement utilisés.



Simulation de mise en radeaux de précipités dans un super-alliage base-nickel sous contrainte uniaxiale (thèse G. Boussinot, thèse A. Gaubert au LEM/ONERA)

Soutenance des doctorants de 1^{ère} année (fin)

Hicham ZAID

Dir. de thèse : M. -H. BERGER
Part. Industriel : Case Western Reserve
University

**Super réseaux oxydes à gaz
d'électrons bidimensionnels pour
mini-électronique en environnement
extrême.**

Ce travail consiste à développer une approche globale pour identifier l'origine de l'apparition de porteurs de charges à l'interface d'hétérostructures à base oxyde, et pour améliorer l'analyse quantitative des facteurs structuraux et de composition qui influent sur les propriétés électroniques de la couche métallique bidimensionnelle à cette interface. En effet, on observe dans des hétérostructures composées de deux isolants de bande à structure pérovskite, SrTiO_3 (non polaire) et LaAlO_3 (polaire), la formation d'un gaz électronique bidimensionnel (2DEG) qui conduit à une transition isolant/conducteur au niveau de l'interface du système.

Les origines physiques de ce gaz électronique formé à l'interface font l'objet de débats intenses, avec absence de consensus sur le sujet. Plusieurs mécanismes ont été proposés, comme la catastrophe polaire à l'interface LaAlO_3 (polaire)/ SrTiO_3 (non polaire), des distorsions structurales à l'interface, la présence de lacunes ou encore une interdiffusion cationique à l'interface.

L'approche proposée permettra non seulement d'identifier les origines des charges aux hétéro-interfaces, mais également de définir le rôle de façon quantitative des facteurs structuraux et de composition, tels que les défauts, les dipôles, les déformations, les propriétés électriques de l'interface.

Ce travail s'inscrit dans un projet international qui implique plusieurs acteurs comme la Case Western Reserve University, l'Université du Michigan et l'Ecole des Mines de Paris. Ce projet rassemble un large éventail de domaines liés à la recherche proposée comme la science des matériaux, la physique, le génie électrique et la microscopie.

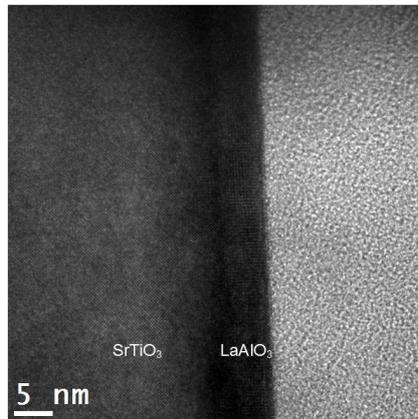


Image HRTEM d'une hétérostructure $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$

Au Centre des Matériaux de l'Ecole des Mines de Paris, nous allons caractériser les échantillons et leur interface en utilisant la microscopie électronique en transmission (TEM) et à balayage (STEM) pour les caractéristiques structurales telles que les défauts, les déformations, l'interdiffusion à l'interface, et d'éventuelles distorsions ferroélectriques. Nous utiliserons la technique EDX et la spectroscopie des pertes d'énergies (EELS) pour étudier l'état de valence et obtenir des informations chimiques allant jusqu'à une résolution atomique.

Les applications en environnement extrême basées sur ces hétéro-interfaces nécessitent une compréhension fondamentale des relations procédés/propriétés/microstructure. Les hétéro-interfaces formant 2DEG peuvent être conçues en tant que transistors et sont applicables pour le développement à l'échelle nanométrique de nouvelle génération de dispositifs de mémoire non volatile à venir. Les applications potentielles de Q-2D-EG comprennent également des supraconducteurs à haute température ou encore des convertisseurs thermoélectriques.

Yi ZHANG

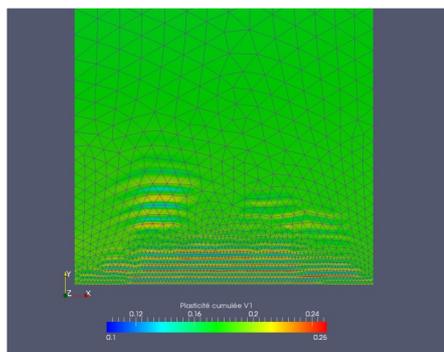
Dir. de thèse : J. BESSON
Co-encadrant de thèse : E. LORENTZ
Part. Industriel : EDF
**Modélisation et simulation robuste de
l'endommagement ductile**

La plupart des structures exposées à des chargements sévères finissent par se dégrader. Prédire le développement de l'endommagement sous chargements accidentels hypothétiques constitue ainsi un enjeu majeur pour garantir la sûreté d'un équipement. La simulation numérique des phénomènes d'endommagement est devenue incontournable, en particulier dans les situations industrielles pour lesquelles l'expérimentation à échelle réelle n'est plus envisageable. C'est le cas pour certains composants majeurs des centrales nucléaires de production d'électricité, tels que la cuve du réacteur ou encore le générateur de vapeur, pour lesquels la taille, les conditions de fonctionnement (pression, température) ou le vieillissement sont difficilement reproductibles expérimentalement de manière intégrale. Or la modélisation par éléments finis de l'ensemble des phénomènes impliqués se heurte encore à plusieurs difficultés, en dépit des nombreux travaux menés sur ce sujet par le passé, et n'a pas atteint un niveau de maturité tel qu'on puisse envisager sa mise en œuvre industrielle.

Tous les modèles d'endommagement ont une caractéristique commune : l'adoucissement négatif ; ce qui conduit à un problème mathématiquement mal posé et aberrant sur le plan physique puisque l'énergie dissipée à rupture y est largement sous-estimée. En pratique, cela se traduit par des résultats dépendant pathologiquement de la discrétisation spatiale. La modélisation des phénomènes doit être enrichie par un couplage des réponses entre points matériels voisins ; on parle alors de modélisation « non locale ». Dans le cadre de l'endommagement ductile que nous allons étudier dans cette thèse, le niveau de déformation plastique est très important. Par conséquent, la

doctorants (fin)

modélisation s'appuie nécessairement sur une cinématique de grandes déformations, et donc un comportement quasi-incompressible.



Bande de localisation de déformation plastique en grande déformation (Modèle Logarithmique, Élément Mixtes P2-P1-P1)

Un problème numérique bien connu, à savoir le verrouillage volumique des éléments finis qui perturbe considérablement la convergence de calculs apparaît en régime ductile. Des solutions existent en plasticité. Certaines se basent sur des termes de stabilisation, fonction de la taille de maille. D'autres sur des formulations variationnelles de type Hu-Washizu en lien avec des éléments finis mixtes qui introduisent non seulement les déplacements mais aussi la pression et le changement de volume comme inconnues principales. Il faut donc examiner dans quelle mesure ces solutions sont compatibles avec le formalisme des grandes déformations, certains travaux préliminaires semblant indiquer une perte d'ellipticité inattendue qui pose le problème de la déformation plastique (cf. Figure). Enfin, la compatibilité des grandes déformations avec la modélisation non locale du comportement devra elle aussi être examinée avec soin, les travaux dans ce domaine restant rares. C'est donc la combinaison d'une loi de comportement, d'un formalisme de grandes déformations et d'une méthode de régularisation non locale qu'il faudra étudier, sans qu'on puisse escompter a priori un découplage de l'une de ces composantes par rapport aux autres.

Sources : les doctorants concernés

ECerS XIII

La 13^e Conférence de l'European Ceramic Society : ECerS XIII (<http://www.ecers2013.fr>) a eu lieu à Limoges du 23 au 27 Juin 2013.



L'aventure céramique européenne a commencé en 1961 par l'organisation, par les sociétés de céramiques britannique et hollandaise, de la première conférence « Science of Ceramics ». Le succès croissant de ces conférences bisannuelles a conduit en 1987 certaines associations européennes de céramiques à se fédérer sous la bannière de l'ECerS et de son journal scientifique (Journal of European Ceramic Society) qui a, soit dit en passant, depuis quelques années, un « impact factor » supérieur à son homologue américain (Journal of American Ceramic Society). La première conférence de l'ECerS fût organisée en 1989 et celle-ci tourne depuis entre les états européens membres (actuellement 27) qui se portent à tour de rôle volontaires pour l'organisation. La France avait déjà accueilli la 5^e édition de l'ECerS, en 1997, à Versailles.

C'est cette fois Limoges et votre serviteur (en tant que co-organisateur) qui ont eu l'honneur (et la charge...) d'organiser, sur le site futuriste d'ESTER Technopôle, cette 13^e conférence, en 2013 ! Il faut croire que ce chiffre nous a porté bonheur puisque ce rassemblement a rencontré un vif succès. Qu'on en juge à partir de quelques chiffres : 1000 inscrits de 53 nationalités différentes, près de 600 communications orales et 300 par affiches, 17 stands d'exposition. Et la participation a largement dépassé le

cadre de l'Europe puisque le troisième pays représenté après la France et l'Allemagne était... le Japon !

La conférence comportait 12 sessions parallèles couvrant des archéomatériaux aux céramiques les plus modernes en passant par les céramiques traditionnelles, les réfractaires et les revêtements céramiques, dans des domaines aussi variés que l'énergie, l'environnement, les sciences et technologies de l'information et la communication, le biomédical... Les salles et amphis étaient mis à disposition par l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Limoges (ENSIL), le Centre Européen de la Céramique (CEC-ENSCI) et ESTER (bâtiment surnommé par les limougeauds « la soucoupe volante »). Pas moins de 80 bénévoles s'étaient mobilisés pour l'organisation pratique. Tout cela a permis de réduire les frais, point important quand on sait que le Groupe Français de la Céramique assumait seul le risque financier de la manifestation. Le mardi soir, une conférence grand public a rassemblé au musée de la céramique Adrien Dubouché quatre orateurs qui ont expliqué, devant un auditoire dense, la naissance de la porcelaine dans le monde.

Pour le monde de la céramique et pour la région du Limousin, cette conférence de l'ECerS a été un événement important, largement couvert par les médias : presse écrite, radio et télévision. La prochaine conférence aura lieu dans deux ans à Tolède : souhaitons-lui aussi un grand succès !

Source : M. BOUSSUGE



Les 12H : Repas champêtre, avec quelques anciens, toujours les bienvenus.

Soutenance HDR

Microstructures et interfaces
céramique/métal obtenues par dépôt
physique : vers une conception
architecturée des systèmes revêtus
multi-matériaux

Vincent GUIPONT

HDR soutenue le 4 Juin 2013

Les travaux résumés dans ce mémoire offrent une synthèse de l'activité de recherche de Vincent GUIPONT, chercheur permanent ARMINES au Centre des Matériaux (UMR 7633) de MINES ParisTech depuis 1996. Ses travaux s'intègrent dans l'activité de recherche «revêtements et traitements de surfaces» du C2P (Centre de Compétence en Procédés de Projection) au sein de l'équipe SIP (Surfaces-Interfaces-Procédés). Ils constituent une contribution dans le domaine du Génie des Matériaux qui est essentiellement dédiée aux dépôts épais issus de poudre projetée en atmosphère neutre ou réactive grâce à l'emploi d'une enceinte multi-procédés de projection plasma CAPS. Cette contribution est portée par l'étude approfondie des microstructures et interfaces céramique/métal obtenues par CAPS, et donc on s'intéresse nécessairement à la maîtrise du procédé de projection plasma en atmosphère contrôlée, notamment pour la maîtrise de la porosité ou de la réactivité in situ. A ce procédé de mise en forme à l'état liquide sont venus s'ajouter d'autres procédés de projection basés sur d'autres modes de transformations de la matière. Ce peut être à l'état solide dans le cas du procédé de projection dynamique par gaz froid ou « cold spray » ou à l'état gazeux dans le cas du procédé EB-PVD. L'ensemble de ces procédés physiques en voie sèche offrent de nombreux modes d'élaboration dont certains encore inexploités pour la synthèse de revêtements multi-matériaux par apport incrémental de matière. Dans cet exposé des travaux, on passe en revue les différentes voies d'élaboration exploitées pour la mise au point de microstructures «composites» de dépôt et des interfaces hétérogènes

substrat/dépôt qui en résultent, plus particulièrement les interfaces céramique/métal. Ceci permet d'introduire une approche architecturée des systèmes de revêtements issus de matière projetée.

Après une description générale de la thématique, trois parties sont présentées. La première traite de la mise-en-oeuvre des structures composites par projection thermique par plasma ou à froid par cold spray en fonction de l'atmosphère contrôlée et de la réactivité associée. La seconde partie met en avant les caractéristiques et propriétés des dépôts associées à la nature composite de la microstructure. Enfin, dans la troisième partie, l'aspect adhérence & fissuration est abordé par l'exposé des travaux au sujet du développement de l'essai d'adhérence LASAT (Laser Shock Adhesion Test) appliqué aux dépôts céramiques obtenus par dépôt physique.

Dans la première partie, l'accent est mis sur l'effet de la pression en projection plasma CAPS (mode HPPS) dont on résume les conditions opératoires à partir d'expérimentation sans poudre ou avec poudres pour l'obtention de dépôt. On introduit alors les différentes voies d'obtention de dépôts multiphasés à base de céramique selon les transformations subies par la poudre pendant le dépôt en mode neutre ou réactif, par co-projection ou post-traitement d'imprégnation par exemple. La porosité est traitée comme une phase à part entière ce qui permet d'exploiter une approche «composite» pour les dépôts CAPS d'une céramique monophasée poreuse dont on entend exploiter l'architecture du réseau de pores pour les propriétés d'usage. C'est pourquoi dans la seconde partie on aborde les caractéristiques morphologiques des microstructures de dépôts projetés essentiellement au travers de l'étude 2D et 3D de la porosité de dépôts plasma céramiques. L'aspect morphologie 3D (porosité, morphologie de particules déposées) est aussi introduit dans le cas des microstructures de dépôts cold spray qui sont encore peu étudiées actuellement. De ces connaissances de

la distribution de la matière, une contribution est donnée sur l'estimation et la mesure des caractéristiques et propriétés mécaniques ou électriques pour les différentes microstructures composites élaborées. La troisième partie est une démonstration de l'essai d'adhérence LASAT appliqué aux dépôts céramiques épais par plasma ou EB-PVD. On décrit en premier les modalités de ce nouvel essai et les retombées avérées et envisagées du diagnostic de la décohésion interfaciale par la «tache blanche». Ce diagnostic est introductif à un nouveau mode d'essai LASAT : le LASAT-2D fondé sur la mesure du diamètre de décohésion dont on expose dans ce mémoire les derniers développements qui concernent à la fois les aspects expérimentaux et numériques. Ces travaux sur l'adhérence permettent de mieux fonder la notion de conception d'interface ou «design d'interface». Il s'agit de toutes opérations visant à modifier les caractéristiques morphologiques, physico-chimiques ou mécaniques d'une interface d'un revêtement avant ou après sa réalisation. Ainsi en combinant le «design d'interface» et la mesure de l'adhérence par LASAT, on positionne le projet de recherche qui sera dédié à l'élaboration de systèmes revêtus par voie physique à base de céramique avec tenue mécanique interfaciale améliorée.

Source : V. GUIPONT



Les 12H
La mascotte
des JO

Stagiaires

Arthur **DESPRES**, du 03 juin au 31 juillet 2013, dans l'équipe M2 avec Henry **PROUDHON**, sur le sujet « Mise au point d'un dispositif de traction in situ pour la tomographie X de laboratoire ».

Laure **PANTALEO**, jusqu'au 31 juillet 2013, dans l'équipe SIP avec Jean - François **HOCHEPIED** (Palaiseau), sur le sujet « synthèse et caractérisation de nanoparticules de NiOH₂, de NiO et de Ni ».

Source : V. DIAMANTINO

Visiteur

Le Professeur Mustapha **BENACHOUR**, de l'Université de Tlemcen (Algérie), sera parmi nous du 27 mai au 7 juin 2013 pour travailler avec M. André **PINEAU** sur le sujet "Etude de l'intégrité mécanique des structures de transport des hydrocarbures, fatigue des gazoducs".

Source : V. DIAMANTINO

JNC18

Les JNC18 (Journées Nationales sur les Composites, 18ième édition) se sont déroulées à l'Ecole Centrale de Nantes du 12 au 14 juin 2013.

Cette manifestation se déroule tous les deux ans et c'est le rendez-vous de la quasi-totalité des laboratoires français qui travaillent sur les composites. Les structures aussi bien que les matériaux font l'objet de présentations réparties sur 3 sessions en parallèle.

Il ressort qu'une très large majorité des études développent ou utilisent des techniques de calcul en lien avec les procédés multiéchelles, et les endommagements présents dans les composites. Dans ce dernier domaine, de nombreux modèles sont écrits où les auteurs souhaitent prendre en compte des directions non fixes d'endommagement. Le constat que l'on peut faire est qu'aucun modèle n'est écrit correctement : l'ensemble des auteurs utilisent des invariants isotropes pour décrire un milieu par définition anisotrope.

Source : A. THIONNET

ICCS17

Le congrès ICCS17 (International Conference on Composite Structures, 17ième édition) s'est déroulé du 17 au 21 juin 2013 à Porto.

Ce congrès est très intimement lié à la revue Journal of Composite Structures (COST) : l'organisateur du congrès et l'éditeur en chef de COST sont la même personne (A. Ferreira).

Les travaux qui ont été présentés portent sur de nombreux domaines : non seulement celui des structures, mais aussi, et cela est plus étrange, celui des matériaux. On peut notamment signaler des calculs et modélisations ab-initio menés par Boeing, sur la résine d'un composite.

Source : A. THIONNET



Les 12H : déguisements sportifs et reporters

La Newsletter du Centre des Matériaux

Mines Paristech - Centre des Matériaux P.M. FOURS
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 : Jacques BESSON
La Page du Cdm...Le Point ! : Odile ADAM
Photographies : Maria BETBEDER (sauf mention contraire)
Comité de relecture : Françoise DI RIENZO, Yves BIENVENU



<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.