

Samuel FOREST  
RAPPORT D'ACTIVITES  
2004—2005

---

## Table des matières

<b>1</b>	<b>CV</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Travaux et objectifs</b>	<b>3</b>
2.1	Mécanique des milieux continus généralisés . . . . .	3
2.1.1	La hiérarchie des milieux d'ordre supérieur . . . . .	3
2.1.2	Application aux mousses métalliques . . . . .	3
2.2	Plasticité cristalline . . . . .	4
2.2.1	Déformation des couches minces . . . . .	4
2.2.2	Effet de taille de grain dans les aciers ferritiques . . . . .	4
2.3	Calcul des microstructures et homogénéisation . . . . .	4
2.3.1	Détermination du Volume Élémentaire Représentatif pour les microstructures réelles . . . . .	5
2.3.2	Le VER en non-linéaire . . . . .	5
2.4	Localisation de la déformation et instabilités . . . . .	5
2.4.1	Phénomènes de Portevin-Le Chatelier dans les structures . . . . .	5
2.4.2	Phénomènes de Portevin-Le Chatelier dans les composites à matrice métallique . . . . .	6
2.5	Perspectives . . . . .	6
2.6	Place de cette recherche au sein de l'unité et collaborations . . . . .	6
2.6.1	Travail au sein de l'équipe . . . . .	6
2.6.2	Collaborations nationales et internationales . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Production scientifique</b>	<b>12</b>
3.1	Revue à comité de lecture . . . . .	12
3.2	Conférences invitées dans des congrès . . . . .	12
3.3	Actes de colloques avec comité de lecture . . . . .	13
3.4	Communications à des congrès avec actes . . . . .	13
3.5	Livres et chapitres dans des ouvrages . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Séminaires, groupes de travail et organisation de congrès</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Visites et séjours dans d'autres laboratoires</b>	<b>14</b>
<b>6</b>	<b>Autres activités liées au métier de chercheur</b>	<b>14</b>
6.1	Enseignement . . . . .	14
6.2	Compléments de formation . . . . .	15
6.3	Contrats avec l'Etat et l'industrie . . . . .	15
6.4	Contrats européens . . . . .	16
6.5	Opérations de communication vers la communauté scientifique, l'industrie ou le grand public . . . . .	16
6.6	Participation à des comités . . . . .	16
6.7	Expertise d'articles de revues internationales . . . . .	16

# 1 CV

**Samuel FOREST**  
**Ingénieur Civil des Mines de Paris**  
**Chargé de Recherches au CNRS**

Adresse personnelle :  
25 rue des Patis  
91540 Mennecy  
marié, 3 enfants  
né le 20.07.68  
à Bourg-en-Bresse

Adresse professionnelle :

**Centre des Matériaux** Pierre-Marie Fourt / UMR 7633  
Ecole des Mines de Paris / CNRS  
B.P. 87, 91003 Evry Cedex  
France Tel : (33) 1 60.76.30.51  
Fax : (33) 1 60.76.31.50  
E-mail : samuel.forest@ensmp.fr  
www.mat.ensmp.fr/Personnel/Forest

**Novembre 2004** : Habilitation à diriger des recherches, délivrée par l'Université Pierre et Marie Curie, jury composé de D. Leguillon, P. Ponte-Castaneda, P. Suquet, E. Busso, G. Cailletaud, G. Maugin, F. Sidoroff. Intitulé du mémoire : *Milieux continus généralisés et matériaux hétérogènes*

**Octobre 2004** : Responsable du cours de *Mécanique des Milieux Continus* du tronc commun Ingénieurs Civils de l'Ecole des Mines de Paris (première année, 24 séances d'1h1/4)

**Juin-Juillet 2003 / Février 2004** : Séjours à l'Institut für Theoretische Physik, TU Berlin, ainsi qu'au Weierstrass Institut für Angewandte Analysis und Stochastik (WIAS), chez les Professeurs W. Muschik et W. Dreyer, Berlin (RFA).

**Octobre 2000** : Chargé de Recherches CR1 CNRS

**Octobre 1996** : Chargé de Recherches CR2 au CNRS UMR 7633 (Centre des Matériaux de l'ENSMP) ; programme de recherches :

*“Modélisation du comportement des matériaux hétérogènes  
dans le cadre de la mécanique des milieux continus généralisés”*

**Janvier 1996** : Docteur de l'Ecole des Mines de Paris et Doctor Communitatis Europae, en Sciences et Génie des Matériaux (mention Très Honorable et Félicitations du Jury). Jury : A. Bertram, R. de Borst, G. Cailletaud, P. Pilvin, P. Rougée, F. Sidoroff, E. Stein, C. Teodosiu, A. Zaoui ; directeur de thèse : G. Cailletaud (Centre des Matériaux). Titre de la thèse :

*“Modèles mécaniques de la déformation hétérogène des monocristaux”*

**1994-1995** : Séjour d'un an au Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung (BAM, Berlin)

**Juin 1993** : Diplôme d'Études Approfondies *“Mécanique et Matériaux”* (mention Très Bien)

**Juin 1992** : Diplôme d'Ingénieur Civil des Mines de Paris, (avec les Félicitations)

**1989-1992** : Etudiant à l'Ecole des Mines de Paris (ENSMP), option *“Sciences et Génie des Matériaux”*

**1986-1989** : Classes préparatoires au Lycée du Parc à Lyon (section M')

**Juin 1986** : Baccalauréat C (mention Très Bien) à Villefranche/Saône

## Distinctions

Prix Jean Mandel pour l'année 2001.

L'étude du “Comportement mécanique des mousses de nickel” par Xavier Badiche encadrée par Michel Croset (NiTECH), Samuel Forest et Yves Bienvenu a reçu le Prix Jules Garnier de la SF2M au titre de l'année 1999 (prix biennal).

Médaille de Bronze du CNRS au titre de l'année 1998.

## 2 Travaux et objectifs

Mon objectif est de formuler et de mettre en œuvre une “**théorie des champs**” de la mécanique non linéaire des matériaux hétérogènes. Cela se traduit par des développements en mécanique des milieux continus généralisés qui permet de prendre en compte la microstructure des matériaux au travers de longueurs caractéristiques. La dominante **plasticité cristalline**, illustration de ces théorie de champs, est appliquée ici au comportement des films minces et à la description des effets de taille de grain. Le **calcul de microstructures**, qui intègre la morphologie explicite 3D des matériaux, est au cœur de l’activité de l’équipe. Quelques avancées sont présentées ici. Enfin, la non linéarité s’exprime aussi au travers d’instabilités dont j’explore une des classes les moins connues du point de vue du calcul de structures, à savoir, les instabilités élastoviscoplastiques associées au vieillissement dynamique des matériaux métalliques.

### 2.1 Mécanique des milieux continus généralisés

Je privilégie le développement et la mise en œuvre numérique des milieux continus 3D possédant des degrés de liberté supplémentaires (de microrotation, de microdéformation...) pour trois raisons. D’abord, la formulation thermomécanique des problèmes aux limites associés à ces milieux est aujourd’hui solidement établie. Ensuite, les techniques d’éléments finis en non linéaire s’appliquent à ces milieux sans difficulté majeure supplémentaire par rapport au cas classique. Enfin, il est possible, par des méthodes de changement d’échelles, de construire de tels milieux à partir d’une microstructure donnée de matériau hétérogène.

#### 2.1.1 La hiérarchie des milieux d’ordre supérieur

Le tableau 1 présente la liste des milieux d’ordre supérieur considérés en fonction du nombre de degrés de liberté supplémentaires. L’approche la plus simple, que je nomme milieu à **microdilatation**, fait appel à un seul scalaire supplémentaire par point matériel. Cette approche est comparable aux modèles utilisés dans les écoulement de géofluides mais aussi, plus récemment, dans les problèmes de remodelage osseux. A l’autre extrême, le milieu **micromorphe** considère la transformation d’un trièdre de directions physiques, non nécessairement matérielles, attaché à chaque point. Cela fait 9 degrés de liberté supplémentaires (cf. [17]). Cette micro-transformation  $\underline{\chi}$  peut se décomposer en une micro-rotation et une micro-déformation pure. Lorsqu’on estime que seules les micro-rotations jouent un rôle, on travaille avec un milieu de **Cosserat**. A l’inverse, lorsque ce sont plutôt les déformations pures qui importent, je propose d’avoir recours au milieu que j’ai baptisé **microstrain**. A ma connaissance, cette théorie d’un milieu avec six degrés de liberté supplémentaires  ${}^x\mathcal{C}$  par point matériel n’avait pas encore été considérée. J’ai proposé pour un tel milieu un formalisme de plasticité en grandes transformations. Le gradient de la transformation  $\underline{F}$  et la micro-déformation pure représentée par un tenseur droit de Cauchy–Green  ${}^x\mathcal{C}$  se décomposent de la manière suivante en parties élastiques et plastiques :

$$\underline{F} = \underline{F}^e \cdot \underline{F}^p, \quad {}^x\mathcal{C} = \underline{\chi}^{pT} \cdot {}^x\mathcal{C}^e \cdot \underline{\chi}^p \quad (1)$$

La micro-déformation plastique  $\underline{\chi}^p$ , non nécessairement symétrique quant à elle, s’obtient à l’aide d’une loi d’évolution. La micro-déformation élastique de Cauchy–Green  ${}^x\mathcal{C}^e$  se déduit alors de la décomposition précédente.

#### 2.1.2 Application aux mousses métalliques

La hiérarchie précédente peut être utilisée pour modéliser les effets d’échelles dans les matériaux hétérogènes à fort contraste de propriétés tels que les mousses métalliques. De tels effets se manifestent par exemple lors de la **localisation de la déformation**, voire la rupture des mousses d’aluminium

et de nickel, cas traités dans [2,21]. On présente ici une autre situation où une telle modélisation peut se révéler utile. Lorsqu'on usine un trou dans une structure constituée de mousse métallique et qu'on la sollicite ensuite en traction, les **concentrations de contraintes** associées dépendent de la taille relative du trou par rapport à la taille des cellules. Les mesures de champs de déformation autour d'un trou présentées dans la thèse de T. Dillard et confrontées à des simulations par éléments finis en plasticité compressible (figures 1(a) et (b)) montrent que la plasticité classique décrit très bien la déformation autour de gros trous. Au contraire, lorsque le trou a un rayon correspondant à 1 ou 2 cellules, la déformation est plus faible en bord de trou et ne conduit pas nécessairement à l'amorçage de la fissure finale. Le modèle micromorphe permet une modélisation continue de ce phénomène somme toute tout à fait intuitif. On montre en effet que dans un milieu micromorphe élastique ou élastoplastique, contrairement aux milieux de Cosserat et à microdilatation, le champ autour d'un trou tend à devenir homogène lorsque sa taille tend vers 0 [18]. Cet effet est illustré par les calculs par éléments finis de la figure 1(c) et (d). Il a été possible d'identifier la longueur caractéristique permettant de rendre compte des mesures de champ pour différentes tailles de trous.

## 2.2 Plasticité cristalline

Différentes conditions de déformation des matériaux cristallins sont envisagées pour lesquelles les gradients de déformation plastique et de rotation du réseau cristallins jouent un rôle essentiel.

### 2.2.1 Déformation des couches minces

L'étude des couches minces avec ou sans substrat dans le cadre du réseau européen RTN SizeDepen (thèse de Filip Siska) est un aspect important de l'analyse des **micro-systèmes** mécaniques mais s'applique aussi à la problématique des **revêtements** [11, 10]. Le **confinement plastique** imposé par l'existence ou non d'un substrat conduit à des déformations hétérogènes que nous avons étudiées par éléments finis en élasticité anisotrope et en élastoplasticité cristalline dans le cas du cuivre. L'influence de la texture  $\{001\}$  ou  $\{111\}$  des films sur les surcontraintes près des **joints de grains** a été mise en évidence.

### 2.2.2 Effet de taille de grain dans les aciers ferritiques

La relation de Hall-Petch est une modélisation macroscopique des effets de taille de grain dans les polycristaux métalliques. Il n'est plus légitime de l'utiliser dès lors que l'on adopte une théorie des champs du polycristal, i.e. lorsque l'on souhaite prévoir le comportement du polycristal à partir d'un calcul de volume élémentaire polycristallin avec une description détaillée des **champs intragranulaires**. Dans le cadre d'une étude avec Arcélor, une approche de Cosserat du monocristal est utilisée pour modéliser l'effet de taille de grain dans les aciers ferritiques. L'intensité de la courbure du réseau cristallin dépend intrinsèquement de la taille absolue des grains. Elle est intégrée dans la modélisation de l'écrouissage du monocristal. Pour l'instant, les effets de taille prévus ne sont qu'en accord qualitatif avec l'expérience [15]. Le travail consiste aujourd'hui à identifier des lois plus réalistes pour le surécrouissage dû à la courbure.

## 2.3 Calcul des microstructures et homogénéisation

Le calcul de microstructures est une voie prometteuse pour la prévision des propriétés des matériaux hétérogènes à fort contraste de propriétés. Il s'appuie sur une prise en compte explicite de la morphologie de la microstructure au sein de volumes élémentaires de matériau, à partir d'images 3D réelles ou synthétiques.

### 2.3.1 Détermination du Volume Élémentaire Représentatif pour les microstructures réelles

La détermination de la taille du VER est la première étape du calcul de microstructures. En collaboration avec le Centre de Morphologie Mathématique de l'École des Mines (D. Jeulin), c'est l'approche statistique du problème que nous mettons en avant. Elle consiste à considérer un nombre suffisant de réalisations pour chaque volume considéré et d'étudier l'espérance et la dispersion des propriétés physiques et mécaniques apparentes de ces volumes. Cette approche, établie par le passé dans le cas de modèles aléatoires de microstructures, a été mise en œuvre pour une microstructure réelle pour laquelle la quantité d'information disponible est plus limitée. La société Unilever a fourni des images 3D de **crèmes glacées**, obtenues par microscopie confocale (figure 2(c)), en posant la question des propriétés mécaniques que de telles images peuvent permettre de prévoir. La question se pose de la représentativité de ces images (ici  $250\mu m \times 250\mu m \times 30\mu m$ ). Pour y répondre, nous avons comparé les propriétés élastiques apparentes du volume complet ainsi que d'une multitude de volumes découpés au sein de l'image de manière régulière ou aléatoire (figure 2(a) et (b)). L'étude de la dispersion de ces propriétés fournit une estimation de la taille du VER. Elle s'est avérée légèrement plus grande que les images fournies [1].

Dans le cas des matériaux à fort contraste de propriétés (mousses, crèmes glacées...), la connectivité de la phase dure joue un rôle fondamental sur la résistance globale. On se propose de développer des instruments de mesures de cette connectivité afin de distinguer différentes morphologies. En particulier un indice de percolation géométrique et un indice de **percolation mécanique** sont introduits dans [1] (cf. figure 2(d)).

### 2.3.2 Le VER en non-linéaire

Il est possible de caractériser le VER à l'aide d'une grandeur, homogène à un volume, appelée **portée intégrale** [1]. Une portée intégrale peut être attribuée à chaque propriété étudiée qu'elle soit géométrique ou physique. Elle est définie sans ambiguïté dans le cas de propriétés linéaires. Le problème reste ouvert en non linéaire. Dans la référence [4], on aborde ce problème pour un mélange de deux phases viscoplastiques caractérisées par une loi de Norton, avec une morphologie de type mosaïque de Voronoi.

## 2.4 Localisation de la déformation et instabilités

Je continue d'explorer les phénomènes de localisation omniprésents en mécanique des matériaux parce que, d'une part, ils sont souvent associés à des longueurs caractéristiques, et, d'autre part, parce qu'ils posent des difficultés fondamentales pour le changement d'échelle. On aborde ici une classe d'instabilités viscoplastiques particulièrement importante dans les applications industrielles. En effet le vieillissement statique/dynamique lié aux interactions dislocations/atomes en solution se manifeste aussi bien dans les aciers que les superalliages à base de nickel ou les alliages de zirconium. Ces instabilités (bandes de Lüders et bandes de Portevin–Le Chatelier) ne sont aujourd'hui pas prises en compte en calcul de structures.

### 2.4.1 Phénomènes de Portevin-Le Chatelier dans les structures

Il existe dans la littérature des modèles simples rendant compte de manière phénoménologique des principaux aspects macroscopiques du vieillissement statique/dynamique des alliages métalliques. La classe de modèles proposée par Estrin–Kubin–McCormick fait appel à une seule variable interne scalaire, homogène à un temps, à intégrer dans les modèles classiques de plasticité. Un tel modèle a été programmé dans le code Zset de l'École des Mines par Stéphanie Graff au cours de sa thèse. Il permet de simuler l'apparition et la propagation de bandes où la vitesse de déformation plastique est intense [6, 7]. Les phénomènes de Lüders et de Portevin–Le Chatelier ont été étudiés essentiellement dans le cas d'éprouvettes de traction. On prétend qu'ils ne se manifestent plus dans les structures

qui possèdent des zones de concentration de contraintes. Des essais et des calculs par éléments finis sur des éprouvettes entaillées montrent en fait que, même si les oscillations observées sur les courbes macroscopiques sont moins marquées qu'en traction simple, des bandes de localisation sont émises dans les zones de concentration. La figure 3(b) montre un tel feu d'artifices en pointe de fissure dans une éprouvette CT. La thèse de J. Belotteau, en relation avec EDF, a pour objet d'étudier les conséquences de ces phénomènes sur la rupture des aciers.

Les thèses de S. Graff et J. Belotteau s'effectuent en coopération avec l'Ecole Centrale de Paris (MSSMAT) sous l'égide de la Fédération Francilienne de Mécanique.

#### 2.4.2 Phénomènes de Portevin-Le Chatelier dans les composites à matrice métallique

L'existence d'obstacles sur le trajet de propagation des bandes de Lüders/PLC peut conduire à des distributions plus homogènes de déformation macroscopique et à une réduction de l'amplitude des oscillations sur les courbes de comportement. C'est ce qui se produit dans certains composites à matrice métallique sensible au vieillissement. Nous avons utilisé les méthodes d'homogénéisation périodique pour prévoir le comportement d'un tel composite particulière alumine/alliage aluminium–magnésium. Les bandes de localisation naissent alors près des inclusions et se propagent dans la matrice. Il reste à étudier l'influence du choix de la cellule élémentaire et de passer à des répartitions aléatoires de particules dans le VER. On s'interroge sur l'existence–même d'un tel VER, en présence de phénomènes de localisation.

Les résultats ont pu être confrontés à l'expérience grâce à une collaboration avec l'université de Braunschweig dans le cadre du réseau RTN DEFINO.

### 2.5 Perspectives

La développement du calcul de microstructures avec, lorsque c'est nécessaire, le recours à la mécanique des milieux continus généralisés, est l'axe principal de recherche que je souhaite poursuivre. L'objectif est d'intégrer un nombre croissant de mécanismes locaux de déformation et de rupture pour conférer un réel pouvoir de prévision à la démarche du calcul de microstructures. Mes trois priorités pour les cinq prochaines années de recherches sont :

- **la fatigue** des alliages mono et polycristallins, via le calcul de microstructures sous chargement cyclique, aujourd'hui inexploré et prioritaire vis-à-vis des partenaires industriels actuels du Centre des Matériaux. Le cas de la fissuration par fatigue des superalliages à base de nickel est traité au travers des thèses de S. Flouriot et N. Marchal. Le cas des couches minces multicristallines sollicitées en cyclique sera la première étape vers la fatigue du polycristal.
- **le maclage** est aujourd'hui un mécanisme quasiment absent du calcul de microstructures mais présent dans de nombreux alliages. Je l'ai déjà abordé sous l'angle de la plasticité cristalline en grandes transformations. Je souhaite faire le lien avec les approches dites en **champs de phases** qui sont partie intégrante de la mécanique des milieux continus généralisés. Des liens étroits existent entre ces approches de plus en plus utilisées et mes développements passés.
- **calcul de microstructures et localisation**. Je souhaite établir une classification des types d'instabilités au sein d'un volume de matériau hétérogène conduisant ou non à l'existence d'un milieu homogène équivalent. De tels travaux existent dans le cas hyperélastique. Je m'intéresse plutôt aux localisations en élastoviscoplasticité et à leur transmission ou non au niveau macroscopique.

### 2.6 Place de cette recherche au sein de l'unité et collaborations

#### 2.6.1 Travail au sein de l'équipe

Le calcul de microstructures est un thème fédérateur qui met à contribution l'ensemble des compétences numériques du laboratoire (dans le domaine du maillage avec V. Mounoury, calcul

parallèle G. Cailletaud, F. Feyel, développement du code de calcul Zset en programmation orientée objet, J. Besson et S. Quilici). Il faut aussi faire appel à l'analyse d'images (F. Nguyen) et à la théorie morphologique des milieux aléatoires (D. Jeulin). L'arrivée en août 2005 d'un nouveau **cluster** de 80 biprocesseurs au Centre des Matériaux marque un changement d'échelle significatif dans le développement du calculs de structures et de microstructures dans l'équipe.

Le lien est fait ensuite avec les expérimentateurs du laboratoire pour le dialogue, les observations et caractérisations nécessaires à la validation de ces calculs : A.-F. Gourgues (EBSD), A. Pineau et Y. Bienvenu (matériaux cellulaires), L. Laiarinandrasana, S. Cantournet, V. Maurel (techniques photomécaniques de mesures de champ), L. Rémy (superalliages monocristallins), M. Boussuge (thèse en cours sur des matériaux réfractaires hétérogènes), J.-L. Strudel (vieillessement dynamique des alliages).

### **2.6.2 Collaborations nationales et internationales**

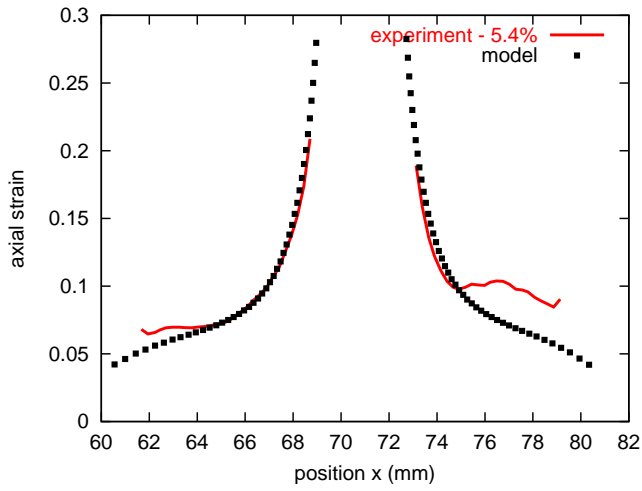
Au sein de la fédération francilienne F2M(msp), le dialogue est établi avec l'ENPC, le LPMTM et le MSSMAT en particulier. Cette dernière coopération se concrétise déjà autour de deux thèses. La coopération avec la fédération CNRS RAMS est aujourd'hui bien assise, en particulier autour de l'étude des mousses métalliques. Elle s'exprime régulièrement au sein du GDR Mousses solides, mais aussi à travers des publications comme [5].

J'entretiens des relations privilégiées avec nos partenaires allemands (Berlin, Magdeburg, Munich) sur les thèmes des milieux continus généralisés et de la plasticité cristalline. Le professeur A. Bertram (Magdeburg) a effectué en 2005 un séjour de 6 mois dans notre laboratoire pour sceller cette coopération.

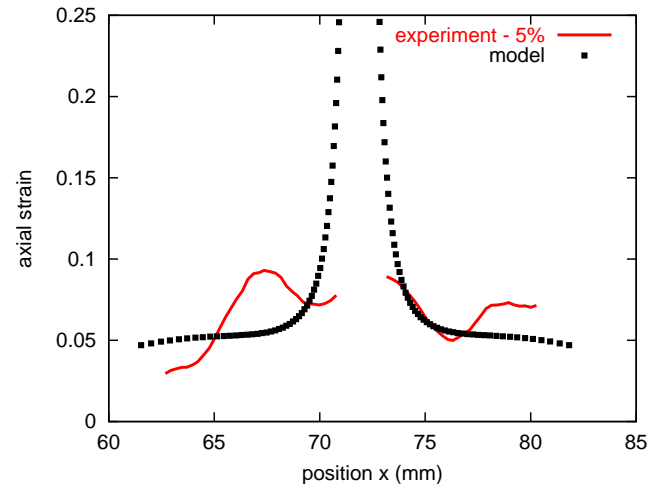
nom	nombre de DDL	DDL (cas fini)	DDL (cas infinitésimal)	références
Cauchy	3	$\underline{u}$	$\underline{u}$	(Cauchy, 1823)
microdilatation	4	$\underline{u}, \chi$	$\underline{u}, \chi$	(Cowin, 1971)
-	5	-	-	-
Cosserat	6	$\underline{u}, \underline{R}$	$\underline{u}, \underline{\Phi}$	(Kafadar, Eringen, 1976)
microstretch	7	$\underline{u}, \chi, \underline{R}$	$\underline{u}, \chi, \underline{\Phi}$	(Eringen, 1990)
microstrain incompressible	8	$\underline{u}, {}^x\mathcal{C}$ $\det {}^x\mathcal{C} = 1$	$\underline{u}, {}^x\mathcal{E}$ $\text{trace } {}^x\mathcal{E} = 0$	-
microstrain	9	$\underline{u}, {}^x\mathcal{C}$	$\underline{u}, {}^x\mathcal{E}$	-
-	10	-	-	-
micromorphe incompressible	11	$\underline{u}, \underline{\chi}$ $\det \underline{\chi} = 1$	$\underline{u}, \underline{\chi}$ $\text{trace } \underline{\chi} = 0$	- -
micromorphe	12	$\underline{u}, \underline{\chi}$	$\underline{u}, \underline{\chi}^s + \underline{\chi}^a$	(Eringen, 1964) (Mindlin, 1964)

TAB. 1 – Hiérarchie de milieux continus d'ordre supérieur. DDL signifie *degré de liberté*. Un nom est proposé pour chaque milieu. Le vecteur de déplacement est  $\underline{u}$ . Des notations différentes sont introduites dans les cas fini et infinitésimal.

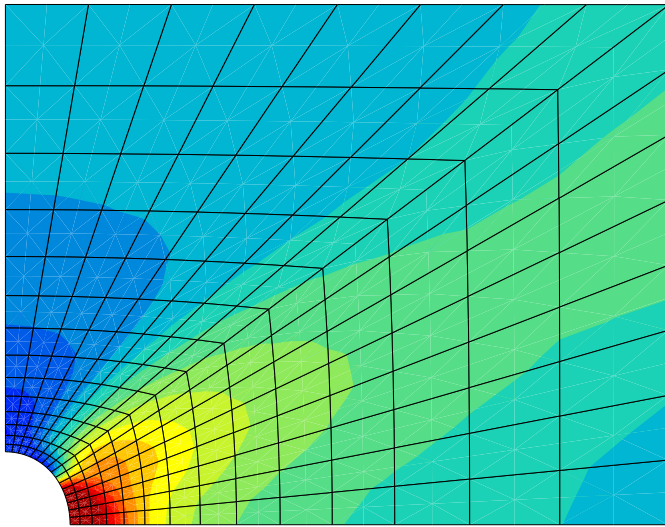




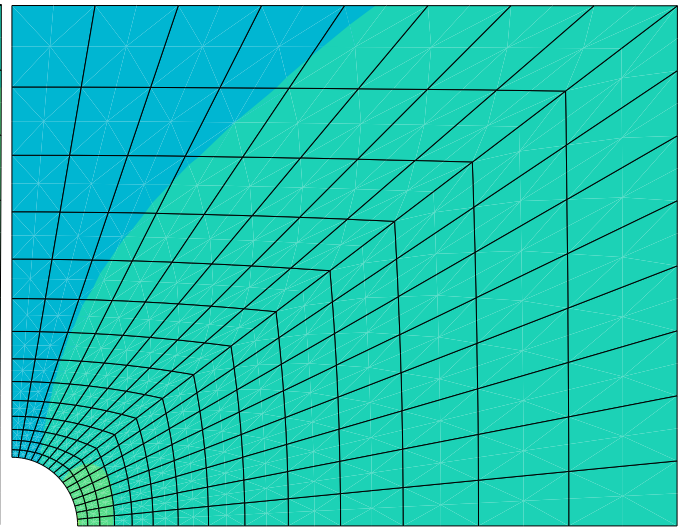
(a)



(b)



(c)



(d)

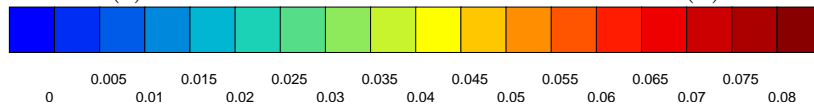


FIG. 1 – Les figures (a) et (b) montrent la composante de déformation axiale le long d’une ligne horizontale sur une plaque de mousse de nickel avec un trou en son centre et sollicitée en traction selon la direction verticale. Ces déformations ont été mesurées pour un trou de rayon  $R = 8l_c$  (a) et  $R = 2l_c$  où  $l_c$  est la taille de cellule. Les résultats expérimentaux sont confrontés à un calcul par éléments finis en plasticité compressible classique. Les figures (c) et (d) montrent les simulations par éléments finis correspondantes avec un milieu micromorphe. Dans le cas (d) du petit trou, le modèle ne prévoit qu’une faible localisation de déformation en bord de trou.

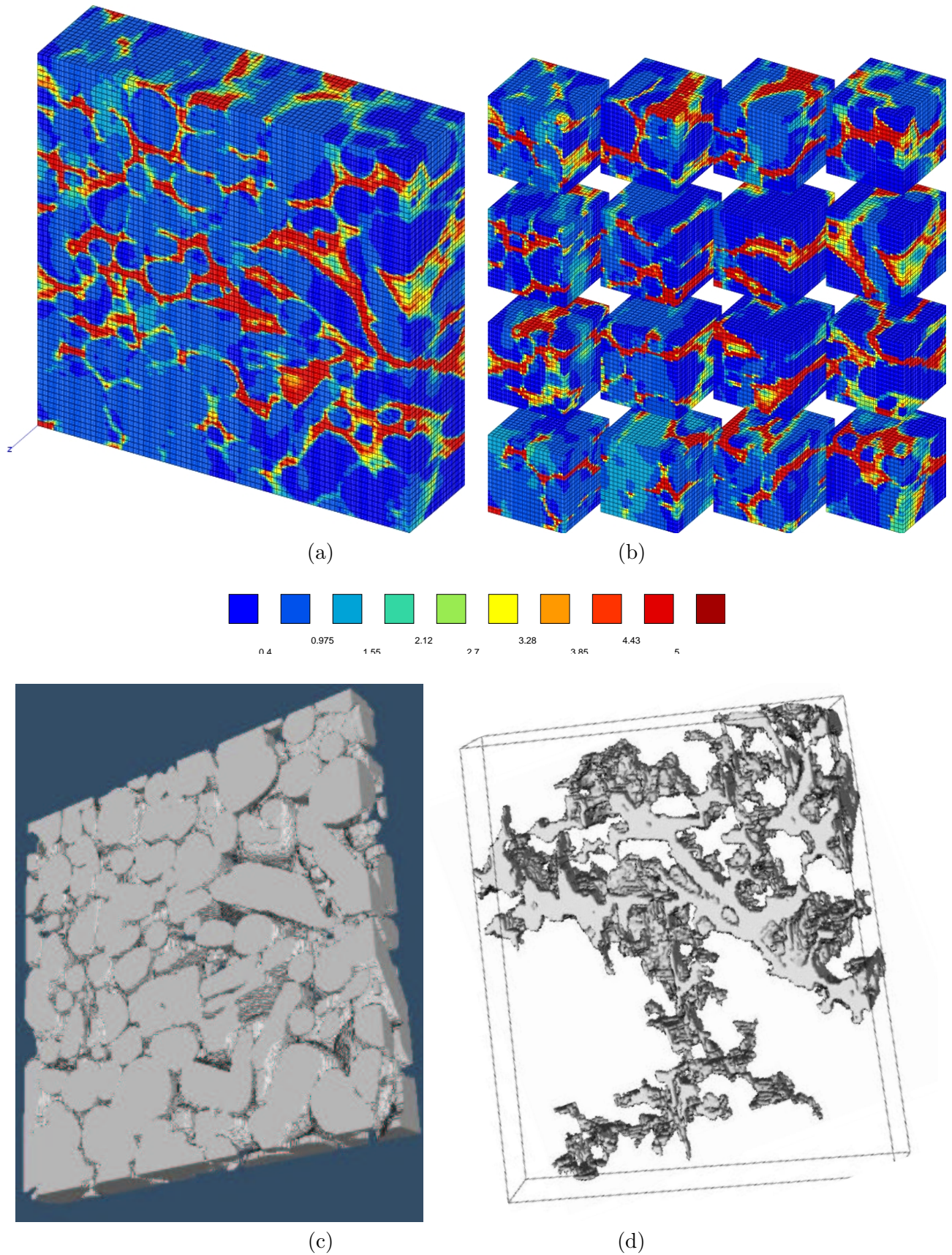
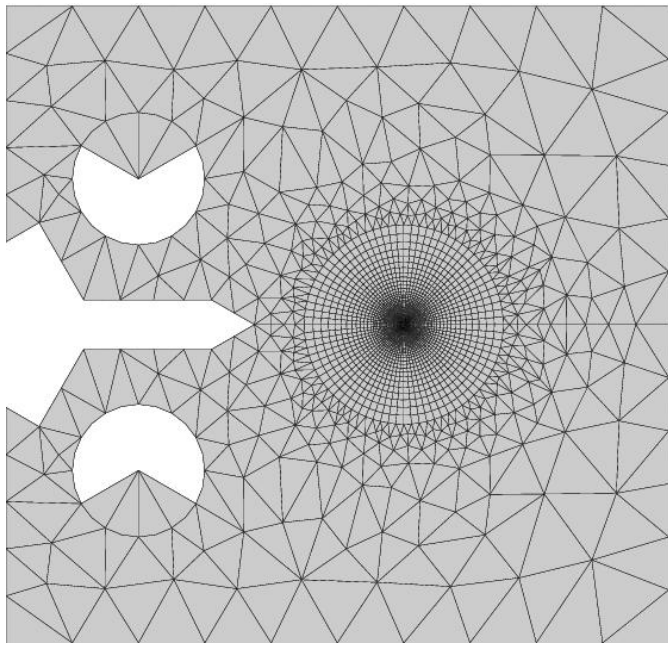
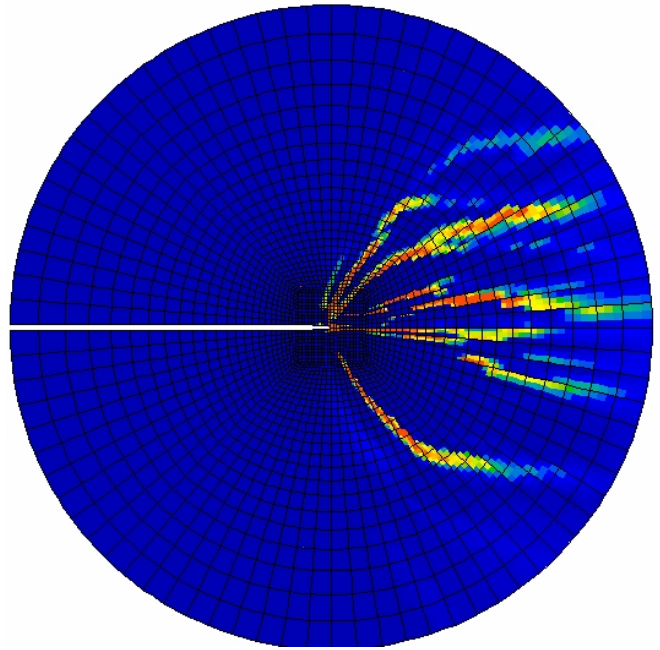


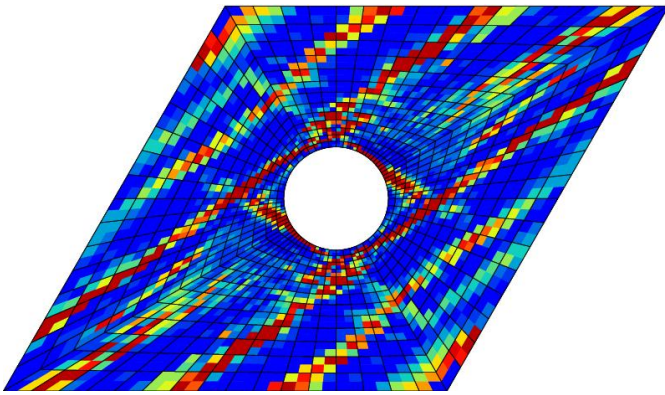
FIG. 2 – Comportement mécanique des crèmes glacées : de l'imagerie confocale (c) au calcul de microstructures (a). La question de la représentativité de tels échantillons est explorée à l'aide de calculs sur des sous-volumes du même échantillon (b). La phase grise est la glace (c). La figure (d) illustre la notion de *percolation mécanique* : il s'agit du domaine connecté de la microstructure dans lequel la déformation équivalente est supérieure à une valeur donnée.



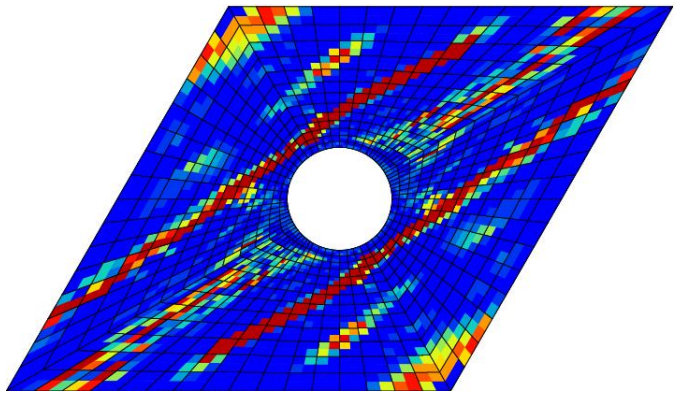
(a)



(b)



(c)



(d)

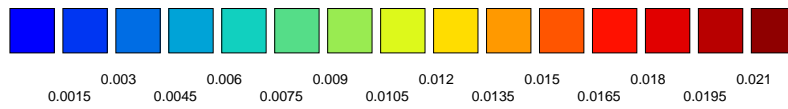


FIG. 3 – Simulation de la formation de bandes de localisation de la vitesse de déformation plastique (a,b) dans une éprouvette CT et (b,c) dans la cellule élémentaire d'un composite à matrice métallique traité par l'homogénéisation périodique. Les figures (c) et (d) correspondent à deux instants de chargement différents.

## 3 Production scientifique

### 3.1 Revues à comité de lecture

- [1] T. Kanit, S. Forest, I. Galliet, V. Mounoury, and D. Jeulin. Apparent and effective physical properties of heterogeneous materials : representativity of samples of two materials from food industry. *to appear in Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2005.
- [2] S. Forest, J.S. Blazy, Y. Chastel, and F. Moussy. Continuum modelling of strain localization phenomena in metallic foams. *to appear in Journal of Materials Science*, 2005.
- [3] A.H. Benouali, L. Froyen, T. Dillard, S. Forest, and F. NGuyen. Investigation on the influence of cell shape anisotropy on the mechanical performance of closed cell aluminium foams using micro-computed tomography. *to appear in Journal of Materials Science*, 2005.
- [4] K. Madi, S. Forest, P. Cordier, and M. Boussuge. Numerical study of creep in two-phase aggregates with a large rheology contrast : Implications for the lower mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 237 :223–238, 2005.
- [5] T. Dillard, F. NGuyen, E. Maire, S. Forest, Y. Bienvenu, J.-D. Bartout, M. Croset, L. Salvo, R. Dendievel, and P. Cloetens. 3D quantitative image analysis of open-cell nickel foams under tension and compression loading using X-ray microtomography. *Philosophical Magazine*, 85 :2147–2175, 2005.
- [6] S. Graff, S. Forest, J.L.S. Strudel, C. Prioul, P. Pilvin, and J.L. Béchade. Finite element simulations of dynamic strain ageing effects at V-notches and crack tips. *Scripta Materialia*, 52 :1181–1186, 2005.
- [7] S. Graff, S. Forest, J.L.S. Strudel, C. Prioul, P. Pilvin, and J.L. Béchade. Strain localization phenomena associated with static and dynamic strain ageing in notched specimens : experiments and finite element simulations. *Materials Science and Engineering A*, 387–389 :181–185, 2004.
- [8] V. Goussery, Y. Bienvenu, S. Forest, A.-F. Gourgues, C. Colin, and J.-D. Bartout. Grain size effect on the mechanical behavior of open-cell nickel foams. *Advanced Engineering Materials*, 6 :432–439, 2004.
- [9] J.-S. Blazy, A. Marie-Louise, S. Forest, Y. Chastel, A. Pineau, A. Awade, C. Grolleron, and F. Moussy. Deformation and fracture of aluminium foams under proportional and non proportional multi-axial loading : Statistical analysis and size effect. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46 :217–244, 2004.
- [10] R. Parisot, S. Forest, A. Pineau, F. Nguyen, X. Démonet, and J.-M. Mategne. Deformation and Damage Mechanisms of Zinc Coatings on Galvanized Steel Sheets, Part II : Damage Modes. *Metallurgical and Materials Transactions*, 35A :813–823, 2004.
- [11] R. Parisot, S. Forest, A. Pineau, F. Grillon, X. Démonet, and J.-M. Mategne. Deformation and Damage Mechanisms of Zinc Coatings on Galvanized Steel Sheets, Part I : Deformation Modes. *Metallurgical and Materials Transactions*, 35A :797–811, 2004.

### 3.2 Conférences invitées dans des congrès

- [12] S. Forest. Continuum modeling of relative and absolute size effects in crystal plasticity. In *IUTAM Symposium on Mechanical Behavior and Micro-Mechanics of Nanostructured Materials*, Beijing, China, June 27–30 2005.
- [13] S. Forest. Micromorphic continua and homogenization methods. In *Size-dependent Mechanics of Materials, Euromech Colloquium 463*, Groningen, The Netherlands, June 13–15 2005.

### 3.3 Actes de colloques avec comité de lecture

- [14] D. Jeulin, T. Kanit, and S. Forest. Representative Volume Element : A statistical point of view. In D. Bergman and E. Inan, editors, *Continuum Models and Discrete Systems*, pages 21–27. Kluwer, 2004.

### 3.4 Communications à des congrès avec actes

- [15] A. Zéghadi, S. Forest, A.-F. Gourgues, and O. Bouaziz. Modélisation continue de l'effet de taille de grain sur le comportement mécanique d'aciers ferritiques. In *17ème Congrès Français de Mécanique*, pages 1–6, Troyes, 2005.
- [16] K. Madi, F. NGuyen, S. Forest, M. Boussuge, J.-Y. Buffière, and D. Jeulin. Etude de la morphologie tridimensionnelle de réfractaires électrofondus. In *17ème Congrès Français de Mécanique*, pages 1–6, Troyes, 2005.

### 3.5 Livres et chapitres dans des ouvrages

- [17] S. Forest. Generalized continua. In K.H.J. Buschow, R.W. Cahn, M.C. Flemings, B. Ilchner, E.J. Kramer, and S. Mahajan, editors, *Encyclopedia of Materials : Science and Technology updates*, pages 1–7. Elsevier, Oxford, 2005.
- [18] S. Forest. *Milieux continus généralisés et matériaux hétérogènes*. Mémoire d'habilitation, 2004.
- [19] S. Forest and Amestoy. *Mécanique des milieux continus*. Cours de l'Ecole des Mines de Paris n° 3121, 264 pages, 2004.
- [20] S. Forest. Generalized continuum modelling of single and polycrystal plasticity, chapter 25. In D. Raabe, F. Roters, F. Barlat, and L.Q. Chen, editors, *Continuum Scale Simulation of Engineering Materials*, pages 513–526. Wiley-VCH, 2004.
- [21] S. Forest and E. Lorentz. Localization and regularization. In J. Besson, editor, *Local approach to fracture*, pages 311–373. Ecole des Mines de Paris–Les Presses, 2004.
- [22] M. Fivel and S. Forest. *Plasticité cristalline et transition d'échelle : cas du polycristal*. Techniques de l'Ingénieur, M4017, 11 pages, 2004.
- [23] M. Fivel and S. Forest. *Plasticité cristalline et transition d'échelle : cas du monocristal*. Techniques de l'Ingénieur, M4016, 23 pages, 2004.

## 4 Séminaires, groupes de travail et organisation de congrès

### Séminaires

S. Forest, *Cosserat Crystal Plasticity*, Seminar on Granular Media, Journée Cosserat Theories, organized by J. Sulem et E. Gretchova, Institut Henri Poincaré, Paris, 9 mars 2005.

S. Forest, *Milieux continus généralisés et homogénéisation*, Laboratoire Sols Solides Structures, Grenoble, 17 juin 2004, puis ENS Cachan LMT, 16 décembre 2004.

### Organisation de congrès

Colloque national Mécamat Aussois 2004 *Mécanismes et mécanique des matériaux et structures à longueur(s) interne(s) : comportement et effets d'échelle*, organisé par Rémy Dendievel, Samuel Forest, Jean-François Ganghoffer et Marie-Hélène Zoberman, 174 participants, précédé d'une Ecole de Mécanique et Matériaux sur ce thème comprenant 3 cours, 25–31 janvier 2004.

## 5 Visites et séjours dans d'autres laboratoires

Deux semaines au Weierstrass Institut für Angewandte Analysis und Stochastik (WIAS), chez le Professeur W. Dreyer (Berlin, février 2004) m'ont permis de me sensibiliser aux problèmes des liens entre modélisation continue et dynamique moléculaire, dimension que je souhaite explorer dans le futur en particulier en vue de la construction de milieux continus généralisés à partir d'ensembles discrets.

## 6 Autres activités liées au métier de chercheur

### 6.1 Enseignement

#### Thèses coencadrées

**2004 Sylvain Flouriot** (coencadrement L. Rémy, 4 juin 2004), *Simulation de la fissuration en fatigue dans les superalliages à base de nickel monocristallins* (partenaire **SNECMA**).

**prévue 2005 Stéphanie Graff** (coencadrement avec J.-L. Strudel et C. Prioul, Ecole Centrale de Paris) : *Simulation des instabilités de type Portevin–Le Chatelier, application aux anomalies de comportement viscoplastique du zirconium* (partenaire **CEA–CNRS**, CPR SMIRN).

**prévue 2005 Nicolas Marchal** (coencadrement L. Rémy) : *Fissuration à haute température de superalliages monocristallins à base de nickel*, (projet européen **SOCRAX**).

**prévue 2006 Kamel Madi** (coencadrement M. Boussuge) : *Caractérisation et simulation du comportement viscoplastique de réfractaires électrofondus à partir de leur microstructure*, (partenaire **SAINT–GOBAIN**).

**prévue 2005 Asmahana Zéghadi** : *Modélisation et simulation de quelques effets d'échelle dans le comportement élastoplastique des aciers*, (partenaire **ARCELOR**).

**prévue 2007 Matthieu Mazière** (coencadrement J. Besson, B. Tanguy) : **Prévision de l'éclatement de disques de turbines** (partenaire **SNECMA–TURBOMECA PRC DDV**).

**prévue 2007 Philippe Siska** (coencadrement, P. Gumbsch, IWM Freiburg (RFA)) : *Approches continues et discrètes pour la plasticité des films minces métalliques* (réseau européen **SIZEDEPEN**).

**prévue 2007 Jeanne Belloteau** (coencadrement C. Prioul, C. Berdin, Ecole Centrale de Paris) *Modélisation de l'influence du vieillissement statique et dynamique sur le comportement et la rupture d'un acier* (partenaire **EDF**).

#### Post-docs

**2002–2004 Fouad El Houdaigui** : Dimensionnement d'un composant multicristallin d'un micro-système mécanique (partenaire **SAGEM**)

**2003–2005 Hakim Benouali** : Modèles continus pour la plasticité des mousses métalliques (projet européen **DEFINO**)

#### Participation à des jurys de thèses

(autres que les thèses coencadrées)

Vladislav Levkovitch, *Classical and extended crystal–plasticity and its application to fatigue of FCC single crystals*, S. Forest, M. Geers, R. Sievert, B. Svendsen, thèse de Doktor–Ingenieur, Université de Dortmund, 30 septembre 2005.

Vincent Marcadon, *Effets de taille et d'interphase sur le comportement mécanique de nanocomposites particuliers*, S. Forest (rapporteur), J. Wittmer (rapporteur), E. Hervé, D. Brown, C. Fond, P. Le Tallec, N. D. Albérola, P. Mélé, A. Zaoui, Ecole Polytechnique, 8 septembre 2005.

Souhail Youssef, *Etude par tomographie X et modélisation par éléments finis du comportement mécanique des mousses solides*, Y. Bréchet, H.P. Degischer, P. Ponte-Castaneda, R. Gaertner, E. Maire, INSA Lyon, 9 décembre 2004.

Sébastien Allain, *Caractérisation et modélisation thermomécaniques multi-échelles des mécanismes de déformation et d'écrouissage d'aciers austénitiques à haute teneur en manganèse – Application à l'effet TWIP*, O. Bouaziz, J.P. Chateau, P. Jacques, J.P. Michel, G. Michot, L. Rémy, Ecole des Mines de Nancy, 9 février 2004.

## Encadrement de stagiaires

Trang Le Thi, *Modélisation du comportement mécanique et de la déchirure ductile de tôles en alliages d'aluminium anisotropes*, stage de master recherche MSE, janvier-juillet 2005.

Vincent Ballarin, *Modélisation du palier de Lüders en vue du calcul par éléments finis de structures en acier*, stage ingénieur 3<sup>ème</sup> année, octobre 2004-décembre 2005.

## Cours dispensés

Tronc commun Ecole des Mines de Paris cycle Ingénieurs Civils, responsable du cours de *Mécanique des milieux continus*, (24 séances d'1h1/4 dont 14 amphis), 2004-2005. Le cours est disponible sur [mms2.ensmp.fr](http://mms2.ensmp.fr).

Cours de *Lois de comportement non linéaires* dans le cadre du Mastère spécialisé COMADIS *Comportement des Matériaux et Dimensionnement des Structures* (15h, depuis 2000). De 2000 à 2003, ce cours était commun au DEA *Modélisation et Simulation en Sciences des Matériaux : de la Molécule à la Structure*, Université de Marne-la-Vallée.

## Formations continues

*Mécanique non linéaire des matériaux : comportement, endommagement et méthodes numériques*, J. Besson, G. Cailletaud, J.L. Chaboche et S. Forest, formation IPSI, 14-17 septembre, Paris, 2004.

## 6.2 Compléments de formation

Participation en tant qu'élève à :

*Size-dependent mechanical properties of materials*, Lorentz Center, Leiden (Holland), February 28th, March 4th, 2005.

## 6.3 Contrats avec l'Etat et l'industrie

PRC Durée de Vie, ONERA-Groupe SAFRAN, *Eclatement des disques de turbines*, partenaires : Turboméca/SNECMA, 2004-2007.

F. El Houdaigui, S. Forest, A.-F. Gourgues, *Propriétés effectives élastoplastiques d'une charnière multicristalline*, convention SAGEM-Armines, 2002-2004.

GDR *Mousses Solides*, CNRS 2002-2005.

Les thèses encadrées sont associées à des contrats industriels dont les partenaires sont : ARCELOR, CEA et EDF.

## 6.4 Contrats européens

Marie-Curie Research Training Network (RTN) entitled *SizeDepEn - Engineering mechanics based on size-dependent materials properties*, partners : Universität Karlsruhe (RFA), University of Edinburgh (RU), Rijksuniversiteit Groningen (The Netherlands), Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik Freiburg (RFA), Eötvös University Budapest (Hungary), contract No. MRTN-CT-2003-504634, 2004–2008.

Research Training Network (RTN) entitled *Deformation and fracture instabilities in novel materials and processes*, partners : Aristotle University Thessaloniki (Greece), University Cambridge (RU), Technical University Delft (The Netherlands), Technical University Braunschweig (Germany), University Libre Brussels (Belgique), Eötvös University Budapest, University Kaiserslautern (Germany), 2003–2007.

Competitive and Sustainable Growth Program, European Project SOCRAX entitled *Expanding the limits of single crystal superalloys through short crack fracture mechanics analysis*, partners : ONERA (France), National Technical University of Athens (Greece), SNECMA Moteurs (France), Siemens Power Generation (FRG), MTU Aero Engines GmbH (FRG), Imperial College of Science, Technology and Medicine (UK), Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (FRG), Consiglio Nazionale delle Ricerche (Italy), Institute of Mechanics of Materials and Gestructures S.A. (Greece), contract No. G5RD-CT-2002-00819, 2002–2006.

## 6.5 Opérations de communication vers la communauté scientifique, l'industrie ou le grand public

*Le secret des crèmes glacées dévoilé par la mécanique*, Actualité du SPI sur le web, <http://www.spi.cnrs-dir.fr/actualite>, septembre 2005.

*Des éponges de métal très convoitées, les qualités du métal, la légèreté en plus : les mousses métalliques font l'objet de nombreuses recherches pour l'énergie*, de Isabelle Bellin, Les Echos n° 19136 paru le 14/04/2004, page Innovation.

Lettre du SPI-CNRS No. 37, dossier *Matériaux et Procédés, Calcul et design de microstructures : une question de longueur interne ?*, pp. 20–21, février 2004.

## 6.6 Participation à des comités

Membre du Conseil de Laboratoire de l'UMR 7633, 2005-.

Membre suppléant de la Commission de Spécialistes de la 60e section de l'université de Metz, 2001-..

Membre suppléant de la Commission de Spécialistes de la 60e section de l'université Paris XIII, 1998-..

Membre du Conseil d'Administration de l'association Mécamat pour le développement de la mécanique des matériaux : responsable des groupes de travail, 1998-.

## 6.7 Expertise d'articles de revues internationales

Acta Materialia	4
Aerospace Science and Technology	1
Comptes Rendus à l'Académie des Sciences	3
Computational Materials Science	3
Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering	1
Continuum Mechanics and Thermodynamics	3
European Journal of Mechanics A/ Solids	5



The European Physical Journal Applied Physics	2
International Journal of Forming Processes	1
International Journal for Multi-scale Computational Engineering	1
International Journal of Plasticity	1
International Journal of Solids and Structures	7
International Journal of Vehicle Design	1
Journal of Engineering Manufacture	2
Journal of Materials Science	3
Journal of the Mechanics and Physics of Solids	3
Journal of Micromechanics and Microengineering	3
Journal of Multiscale Computational Engineering	1
Journal of Physics A : Mathematical and General	2
Journal de Physique IV	6
Mécanique et Industries	4
Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering	2
Philosophical Magazine A	3
Proceedings A of the Royal Society	1
Revue de Métallurgie	2
Scripta Materialia	8
Technische Mechanik	2
Zentralblatt Mathematik	5