

**CV, Liste des Publications**  
**Résumé des travaux principaux**

Dossier de candidature  
à l'habilitation  
à diriger des recherches

Samuel FOREST

18 mars 2004



**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

**Juin–Juillet 2003/Février 2004** : Séjour à l’Institut für Theoretische Physik, Technische Universität Berlin, chez le Professeur W. Muschik, ainsi qu’au Weierstrass Institut für Angewandte Analysis und Stochastik (WIAS), chez le Professeur W. Dreyer, Berlin (RFA).

**Octobre 1996** : Chargé de Recherches 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, RFA)

**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.



## Activités de la recherche et publications

### 1 Publications

#### Revues à comité de lecture

- [1] 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*, in press, 2004.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] G. Cailletaud, O. Diard, F. Feyel, and S. Forest. Computational crystal plasticity :from single crystal to homogenized polycrystals. *Technische Mechanik*, 23:130–145, 2003.
- [5] S. Flouriot, S. Forest, G. Cailletaud, A. Köster, L. Rémy, B. Burgardt, V. Gros, S. Mosset, and J. Delautre. Strain localization at the crack tip in single crystal ct specimens under monotonous loading : 3D finite element analyses and application to nickel-base superalloys. *International Journal of Fracture*, 124:43–77, 2003.
- [6] F. Barbe, S. Forest, S. Quilici, and G. Cailletaud. Numerical study of crystalline plasticity : measurements of the heterogeneities due to grain boundaries under small strains. *La Revue de Métallurgie*, Septembre:pp. 815–823, 2003.
- [7] G. Cailletaud, J.-L. Chaboche, S. Forest, and L. Rémy. On the design of single crystal blades. *La Revue de Métallurgie*, Février:pp. 165–172, 2003.
- [8] T. Kanit, S. Forest, I. Galliet, V. Mounoury, and D. Jeulin. Determination of the size of the representative volume element for random composites : statistical and numerical approach. *International Journal of Solids and Structures*, 40:3647–3679, 2003.
- [9] G. Cailletaud, S. Forest, D. Jeulin, F. Feyel, I. Galliet, V. Mounoury, and S. Quilici. Some elements of microstructural mechanics. *Computational Materials Science*, 27:351–374, 2003.
- [10] S. Flouriot, S. Forest, and L. Rémy. Strain localization phenomena under cyclic loading : Application to fatigue of single crystals. *Computational Materials Science*, 26:61–70, 2003.
- [11] S. Forest and R. Sedláček. Plastic slip distribution in two-phase laminate microstructures: Dislocation-based vs. generalized-continuum approaches. *Philosophical Magazine A*, 83:245–276, 2003.
- [12] S. Forest and R. Sievert. Elastoviscoplastic constitutive frameworks for generalized continua. *Acta Mechanica*, 160:71–111, 2003.
- [13] S. Forest. Homogenization methods and the mechanics of generalized continua–Part 2. *Theoretical and Applied Mechanics*, 28–29:113–143, 2002.
- [14] F. Eberl, S. Forest, T. Wroblewski, G. Cailletaud, and J.-L. Lebrun. Finite element calculations of the lattice rotation field of a tensile loaded nickel base alloy multicrystal and comparison

- to topographical X-ray diffraction measurements. *Metallurgical and Materials Transactions*, 33A:2825–2833, 2002.
- [15] S. Forest, G. Cailletaud, D. Jeulin, F. Feyel, I. Galliet, V. Mounoury, and S. Quilici. Introduction au calcul de microstructures. *Mécanique et Industries*, 3:439–456, 2002.
- [16] S. Forest, R. Sievert, and E.C. Aifantis. Strain gradient crystal plasticity : Thermomechanical formulations and applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 13:219–232, 2002.
- [17] R. Sedláček, W. Blum, J. Kratochvíl, and S. Forest. Subgrain formation during deformation : physical origin and consequences. *Metallurgical and Materials Transactions*, 33A:319–327, 2002.
- [18] S. Forest, F. Pradel, and K. Sab. Asymptotic analysis of heterogeneous Cosserat media. *International Journal of Solids and Structures*, 38:4585–4608, 2001.
- [19] F. Barbe, S. Forest, and G. Cailletaud. Intergranular and intragranular behavior of polycrystalline aggregates. Part 2: Results. *International Journal of Plasticity*, 17:537–563, 2001.
- [20] S. Forest, P. Boubidi, and R. Sievert. Strain localization patterns at a crack tip in generalized single crystal plasticity. *Scripta Materialia*, 44:953–958, 2001.
- [21] R. Parisot, S. Forest, A.-F. Gourgues, A. Pineau, and D. Mareuse. Modeling the mechanical behavior of a multicrystalline zinc coating on a hot-dip galvanized steel sheet. *Computational Materials Science*, 19:189–204, 2001.
- [22] T. Hoc and S. Forest. Polycrystal modelling of IF-Ti steel under complex loading path. *International Journal of Plasticity*, 17:65–85, 2001.
- [23] R. Sedláček and S. Forest. Non-local plasticity at microscale : A dislocation-based model and a Cosserat model. *physica status solidi (b)*, 221:583–596, 2000.
- [24] X. Badiche, S. Forest, T. Guibert, Y. Bienvenu, J.-D. Bartout, P. Ienny, M. Croset, and H. Bernet. Mechanical properties and non-homogeneous deformation of open-cell nickel foams : application of the mechanics of cellular solids and of porous materials. *Materials Science and Engineering A*, A289:276–288, 2000.
- [25] S. Forest, F. Barbe, and G. Cailletaud. Cosserat modelling of size effects in the mechanical behaviour of polycrystals and multiphase materials. *International Journal of Solids and Structures*, 37:7105–7126, 2000.
- [26] S. Forest. Aufbau und Identifikation von Stoffgleichungen für höhere Kontinua mittels Homogenisierungsmethoden. *Technische Mechanik*, Band 19, Heft 4:297–306, 1999.
- [27] S. Forest, R. Dendievel, and G.R. Canova. Estimating the overall properties of heterogeneous Cosserat materials. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, 7:829–840, 1999.
- [28] S. Forest and K. Sab. Cosserat overall modeling of heterogeneous materials. *Mechanics Research Communications*, 25(4):449–454, 1998.
- [29] S. Forest. Modeling slip, kink and shear banding in classical and generalized single crystal plasticity. *Acta Materialia*, 46(9):3265–3281, 1998.
- [30] S. Forest, G. Cailletaud, and R. Sievert. A Cosserat theory for elastoviscoplastic single crystals at finite deformation. *Archives of Mechanics*, 49(4):705–736, 1997.
- [31] S. Forest and G. Cailletaud. Strain localization in single crystals: Effect of boundaries and interfaces. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 14(5):747–771, 1995.

## Conférences invitées dans des congrès

- [32] S. Forest. Homogénéisation et calcul de microstructures : notion de Volume Élémentaire Représentatif et effet de taille de grain dans les polycristaux métalliques. In *Congrès Français de Mécanique*, Nice, France, 1–5 September 2003.
- [33] S. Forest and G. Cailletaud. Large scale 3D computations of microstructures : numerical tools and applications. In K. Sobczyk, editor, *34<sup>th</sup> Solid Mechanics Conference*, Zakopane, Poland, 2–7 September 2002.
- [34] S. Forest. Analyse critique de quelques modèles à gradients en plasticité cristalline. In J.-Y. Buffières, E. Maire, and R. Estévez, editors, *Plasticité 2002*, Francheville, Lyon, 15–17 Mai 2002.
- [35] S. Forest and M. Fivel. Modèles discrets et continus de la plasticité des métaux : du monocristal au polycristal. In J. Ayache and J.-P. Morniroli, editors, *Microscopie des défauts cristallins, Ecole thématique CNRS*, pages 457–466, Oléron, 2001. Société Française de Microscopie.
- [36] S. Forest. Continuum modelling of deformation mechanisms at a crack tip in single crystals. In A.-M. Habraken, editor, *4th International ESAFORM Conference on Material Forming*, pages 487–490, Liège, 23–25 April 2001. Université de Liège.
- [37] S. Forest. Cosserat modeling of size effects in polycrystals. In J.L. Bassani L.P. Kubin, R.L.P. Selinger and K. Cho, editors, *Multiscale Materials Modeling-2000*, volume 653, pages Z8.2.1–Z8.2.12, Boston, 2001. Material Research Society.
- [38] S. Forest. Strain localization phenomena as elementary deformation mechanism of different materials classes. In *20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, ICTAM2000*, Chicago, 27 August–2 September 2000.
- [39] S. Forest. Modelling size effects in crystals. In *Fourth International Congress on Industrial and Applied Mathematics, Mini-symposium on Phase field models and prediction of micro-morphological changes in alloys*, Edinburgh, July 1999.
- [40] J.-M. Cardona, S. Forest, and R. Sievert. Towards a theory of second grade thermoelasticity. *Extracta Mathematicae*, 14(2):127–140, 1999.
- [41] S. Forest and P. Pilvin. Modelling finite deformation of polycrystals using local objective frames. *Z. Angew. Math. Mech.*, 79:S199–S202, 1999.
- [42] S. Forest and K. Sab. Overall modelling of periodic heterogeneous Cosserat media. In E. Inan and Z. Markov, editors, *Ninth International Symposium on Continuum Models and Discrete Systems, CMDS9*, pages 445–453. World Scientific Publishing Company, 1998.
- [43] S. Forest. Mechanics of generalized continua : Construction by homogenization. *Journal de Physique IV*, 8:Pr4–39–48, 1998.
- [44] S. Forest. Homogenization methods and the mechanics of generalized continua. In G. Maugin, editor, *International Seminar on Geometry, Continuum and Microstructure*, pages 35–48. Travaux en Cours No. 60, Hermann, 1999.
- [45] S. Forest. Strain localization phenomena in generalized crystal plasticity. In *Second Euroconference and International Symposium on Material Instabilities in Deformation and Fracture*, volume 11, pages 45–50, organized by E.C. Aifantis, Aristotle Technical University, Thessaloniki, Greece, 1997.

## Actes de colloques avec comité de lecture

- [46] F. Barbe, R. Parisot, S. Forest, and G. Cailletaud. Calibrating a homogenized polycrystal model from large scale FE computations of polycrystalline aggregates. *Journal de Physique IV*, 11:Pr5–277–284, 2001.
- [47] R. Dendievel, S. Forest, and G. Canova. An estimation of overall properties of heterogeneous Cosserat materials. *Journal de Physique IV*, 8:Pr8–111–118, 1998.
- [48] S. Kruch and S. Forest. Computation of coarse grain structures using a homogeneous equivalent medium. *Journal de Physique IV*, 8:Pr8–197–205, 1998.
- [49] S. Quilici, S. Forest, and G. Cailletaud. On size effects in torsion of multi- and polycrystalline specimens. *Journal de Physique IV*, 8:Pr8–325–332, 1998.
- [50] R. Sievert, S. Forest, and R. Trostel. Finite deformation Cosserat-type modelling of dissipative solids and its application to crystal plasticity. *Journal de Physique IV*, 8:Pr8–357–364, 1998.
- [51] S. Forest and P. Pilvin. Modelling the cyclic behaviour of two-phase single crystal nickel-base superalloys. In A. Pineau and A. Zaoui, editors, *IUTAM Symposium on micromechanics of plasticity and damage of multiphase materials*, pages 51–58. Kluwer, 1996.

## Communications à des congrès avec actes

- [52] F. Dillard, T. NGuyen, S. Forest, Y. Bienvenu, J.-D. Bartout, L. Salvo, R. Dendievel, E. Maire, P. Cloetens, and C. Lantuéjoul. In-situ observation of tensile deformation of open-cell nickel foams by means of X-ray microtomography. In J. Banhart, N.A. Fleck, and A. Mortensen, editors, *Cellular Metals Manufacture Properties Applications*, pages 301–306. Verlag MIT Publishing, 2003.
- [53] V. Goussey, Y. Bienvenu, S. Forest, A.-F. Gourgues, C. Colin, and J.-D. Bartout. Grain size effects on the mechanical behaviour of open-cell nickel foams. In J. Banhart, N.A. Fleck, and A. Mortensen, editors, *Cellular Metals Manufacture Properties Applications*, pages 419–424. Verlag MIT Publishing, 2003.
- [54] S. Forest and R. Parisot. Material crystal plasticity and deformation twinning. *Rendiconti del Seminario Matematico dell’Università e del Politecnico di Torino*, 58:99–111, 2000.
- [55] F. Barbe, S. Forest, and G. Cailletaud. Polycrystalline plasticity under small strains. In E. Bouchaud *et al.*, editor, *Physical Aspects of Fracture*, pages 191–206. Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [56] J. Huang, K. Kalaitzidou, J.W. Sutherland, W.W. Milligan, E.C. Aifantis, R. Sievert, and S. Forest. Gradient plasticity : Implications to chip formation in machining. In A.-M. Habraken, editor, *4th International ESAFORM Conference on Material Forming*, pages 527–530. Université de Liège, Belgium, 2001.
- [57] R. Parisot, S. Forest, and A. Pineau. Deformation mechanisms of zinc : coating vs. bulk material. In D. Miannay, P. Costa, D. François, and A. Pineau, editors, *Advances in Mechanical Behaviour, Plasticity and Damage, EUROMAT 2000*, pages 407–412. Elsevier, 2000.
- [58] Y. Chastel, E. Hudry, S. Forest, and C. Peytour. Mechanical behaviour of aluminium foam for various deformation paths. Experiment and modelling. In J. Banhart, M.F. Ashby, and N.A. Fleck, editors, *Metal foams and Porous Metal Structures*, pages 263–268. Verlag MIT Publishing, 1999.



- [59] F. Barbe, G. Cailletaud, and S. Forest. F.E. study of the surface effect in polycrystalline aggregates. In *Transactions of the 15<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-15)*, pages XII–17–28, Seoul, Korea, 1999.
- [60] J.-M. Cardona and S. Forest. Analyse par éléments finis de l'élasticité des milieux du second gradient. In *14<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique*, Toulouse, 1999.
- [61] J. Besson, F. Bultel, and S. Forest. Plasticité des milieux de Cosserat. In *4<sup>ème</sup> Colloque en Calcul des Structures, CSMA*, pages 759–764, Giens, 1999. Teknea.
- [62] S. Forest. Identification of material parameters for elastoplastic Cosserat continua using homogenization methods. In F. Darve and B. Loret, editors, *Conference to the memory of J.-P. Boehler*, Grenoble, 1999.
- [63] S. Forest. A Cosserat theory for single crystals with application to strain localisation phenomena. In J. Salençon, editor, *Symposium Saint-Venant, Multiple scale analyses and coupled physical systems*, pages 373–380, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1997. Presses de l'ENPC.
- [64] M.D. Dupuits, S. Forest, and M. Boussuge. Characterisation and simulation of the mechanical behaviour of multilayered components composing a fibrous head gasket. In A. Vautrin, editor, *EUROMECH 360, Mechanics of sandwich structures : modelling, numerical simulation, experimental identification*, pages 139–146, St Etienne, 1997. Kluwer Academic Publishers.
- [65] S. Forest, J. Han, P. Pilvin, and J. Olschewski. Parameter identification for anisotropic gas turbine blade alloys. In J.A. Désidéri, C. Hirsch, and P. Le Tallec, editors, *ECCOMAS Computational methods in applied sciences '96*, pages 393–400. J. Wiley, 1996.
- [66] S. Forest, J. Olschewski, J. Ziebs, H.-J. Kühn, J. Meersmann, and H. Frenz. The elastic/plastic deformation behaviour of various oriented sc16 single crystals under combined tension/torsion fatigue loading. In G. Lütjering and H. Nowack, editors, *Sixth International Fatigue Congress*, pages 1087–1092. Pergamon, 1996.

### **Communications à des congrès sans actes**

- [67] T. Dillard and S. Forest. Micromorphic modelling of nickel foams : application to stress concentration around holes and crack propagation. In *5th Euromech Solid Mechanics Conference*, Thessaloniki, Greece, 2003.
- [68] S. Flouriot and S. Forest. Strain localization at the crack tip in single crystals: Classical/generalized crystal plasticity solutions vs. experimental results for nickel–base superalloys. In *5th Euromech Solid Mechanics Conference*, Thessaloniki, Greece, 2003.
- [69] J.-S. Blazy, S. Forest, A. Pineau, and Y. Chastel. Deformation and fracture of aluminium foam under uniaxial loading conditions : Statistical analysis and size effect. In *MATERIAUX 2002*, Tours, France, 2002.
- [70] T. Kanit, S. Forest, V. Mounoury, and D. Jeulin. Determination of the representative volume element for homogenization of a two–phase random medium. In *MATERIAUX 2002*, Tours, France, 2002.
- [71] F. Barbe, O. Diard, S. Forest, and G. Cailletaud. From local heterogeneous stress-strain fields to inter or intragranular cracking in polycrystalline aggregates : Large scale finite element computations. In *WCCM V, Fifth World Congress on Computational Mechanics*, Vienna, Austria, 2002.
- [72] G. Cailletaud, S. Forest, and L. Rémy. Dimensionnement des aubes de turbines monocristallines. In *Journées d'Automne de la SF2M*, Paris, France, 2001.

- [73] Y. Bienvenu, J.-D. Bartout, and S. Forest. Metallic foams, some processing and behavioral aspects. In *JMC7, 7èmes Journées de la Matière Condensée*, Poitiers, France, 2000.
- [74] F. Barbe, S. Forest, and G. Cailletaud. Continuum modelling of grain size effects in polycrystals. In *4th Euromech Solid Mechanics Conference*, Metz, France, 2000.
- [75] P. Boubidi, S. Forest, J. Olschewski, and R. Sievert. Viscoplastic calculations of the strain localization at large cracks in single crystals. In *4th Euromech Solid Mechanics Conference*, Metz, France, 2000.
- [76] J.-M. Cardona and S. Forest. Construction of a second grade homogeneous equivalent medium for heterogeneous materials submitted to slowly-varying mean fields. In *4th Euromech Solid Mechanics Conference*, Metz, France, 2000.
- [77] R. Sievert and S. Forest. Remarks on flow rules in strain gradient plasticity theory. In *4th Euromech Solid Mechanics Conference*, Metz, France, 2000.
- [78] M. Croset, Y. Bienvenu, and S. Forest. Les mousses de nickel à structure ouverte : applications, élaboration et propriétés. In *Journées d'Automne de la SF2M*, Paris, 1998.
- [79] Y. Chastel, E. Hudry, S. Forest, and C. Peytour. Déformation de mousses d'aluminium. In *Journées d'Automne de la SF2M*, Paris, 1998.
- [80] F. Barbe, S. Forest, and G. Cailletaud. Modelling grain size and free surface effects in polycrystals. In S. Schmauder and M. Dong, editors, *8th International Workshop in Computational Mechanics of Materials*, University of Stuttgart, 1998.
- [81] Ch. Bourgin, Th. Guibert, J.-D. Bartout, Y. Bienvenu, S. Forest, H. Bernet, and M. Croset. Caractérisation et modélisation du comportement mécanique des mousses de nickel. In *Colloque National de Métallurgie des Poudres, SF2M, Commission de Métallurgie des Poudres et Frittage*, Grenoble, 1998.

### **Livres et chapitres dans des ouvrages**

- [82] M. Fivel and S. Forest. *Plasticité cristalline et transition d'échelle : cas du monocristal*. Techniques de l'Ingénieur, M4016, 23 p., 2004.
- [83] J. Besson, G. Cailletaud, J.-L. Chaboche, and S. Forest. *Mécanique non linéaire des matériaux*. 445 p., Hermès, France, 2001.
- [84] S. Forest. Cosserat media. In K.H.J. Buschow, R.W. Cahn, M.C. Flemings, B. Ilshner, E.J. Kramer, and S. Mahajan, editors, *Encyclopedia of Materials : Science and Technology*, pages 1715–1718. Elsevier, 2001.
- [85] S. Forest, E. van der Giessen, and L. Kubin, Editors. *Scale transitions from atomistics to continuum plasticity*. J. Phys. IV, France, Vol. 11, Pr5, Les Editions de Physique, 2001.
- [86] S. Forest, J.-M. Cardona, and R. Sievert. Thermoelasticity of second-grade media. In G.A. Maugin, R. Drouot, and F. Sidoroff, editors, *Continuum Thermomechanics, The Art and Science of Modelling Material Behaviour, Paul Germain's Anniversary Volume*, pages 163–176. Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [87] J. Ziebs, J. Bressers, H. Frenz, D.R. Hayhurst, H. Klingelhöffer, and S. Forest. *Proceedings of the International Symposium on Local strain and temperature measurements in non-uniform fields at elevated temperatures, Berlin*. Woodhead Publishing Limited, 1996.

## 2 Résumé des travaux de recherches

La prise en compte de la microstructure dans la modélisation continue des matériaux se fait de différentes façons selon les communautés scientifiques concernées. Les méthodes d'homogénéisation permettent de prévoir l'influence de la morphologie des phases en présence sur le comportement macroscopique du matériau hétérogène. Pour d'autres chercheurs, les milieux à microstructure évoquent les extensions de la mécanique des milieux continus classiques apparues massivement dans les années 1960. Ces théories permettent en fait de rendre compte d'effets d'échelles observés dans le comportement des matériaux. L'objectif du programme de recherches a été de tisser des liens entre ces deux approches pour combiner les deux finalités citées. Pour cela, on a d'abord étudié plus en profondeur la mécanique des milieux continus généralisés. On a ensuite apporté des réponses aux deux problèmes d'homogénéisation distincts suivants : peut-on, d'une part, construire un milieu continu généralisé de substitution par homogénéisation à partir d'un milieu continu classique hétérogène? Par quel type de milieu homogène de substitution peut-on remplacer un milieu continu généralisé hétérogène et comment calculer ses propriétés effectives? Enfin ces méthodes ont été mises en œuvre pour développer une véritable discipline nouvelle de la mécanique des matériaux hétérogènes que nous appelons *le calcul de microstructures*. Il s'agit d'une entreprise mettant à contribution plusieurs équipes et plusieurs chercheurs de l'Ecole des Mines et de l'ONERA (Centre des Matériaux, Centre de Géostatistique, Centre de Morphologie Mathématique).

### Thermomécanique des milieux continus généralisés

On s'est attaché à élaborer un cadre thermomécanique unifié permettant d'intégrer dans une présentation commune la mécanique des milieux d'ordre supérieur (Cosserat, micromorphe), de degré supérieur (théorie du second gradient), et à gradient de variable interne. En particulier, on propose une théorie micromorphe en grandes transformations pour des comportements élastoviscoplastiques. Cette théorie est appliquée à la simulation du comportement et de la rupture des mousses métalliques. Une théorie de la thermoélasticité du second gradient a également été établie pour la première fois, semble-t-il. La formulation a des implications sur l'équation de la chaleur qui ont été comparées à des modèles issus de la thermodynamique dite étendue.

Un jeu complet de lois de comportement a été proposé pour décrire la réponse élastoviscoplastique des monocristaux métalliques en transformations finies à l'aide d'un milieu de Cosserat. L'approche inclut un terme de durcissement supplémentaire lié à la courbure de réseau cristallin. Le modèle concilie la plasticité cristalline classique et certains aspects de la théorie continue des dislocations. Grâce à une modélisation simplifiée du comportement collectif de dislocations-vis dans des couches minces monocristallines, on a pu montrer la pertinence de l'approche par la mécanique des milieux continus généralisés, et identifier certains paramètres en les reliant à la notion de tension de ligne des dislocations. Le modèle a ensuite été appliqué au champ de déformation en pointe de fissure dans un monocristal afin de constater les différences par rapport à la théorie classique établie par Rice. On trouve que le paramètre supplémentaire du modèle de Cosserat permet de contrôler, voire de réduire considérablement, l'intensité des bandes de localisation de la déformation dites en genou (*kink bands*) pouvant se développer en pointe de fissure. Des travaux expérimentaux dans le cadre d'une thèse ont montré l'existence de telles bandes dans des monocristaux de superalliage à base de nickel.

### Milieux continus généralisés et homogénéisation

On introduit d'abord la notion de *structure à gros grains*, on entend par là une structure constituée d'un matériau hétérogène soumis à un chargement tel que la longueur d'onde  $L_0$  de variation des champs appliqués n'est pas infiniment grande devant la taille  $l$  des hétérogénéités. C'est donc une notion qui associe

le matériau et le type de chargement. Des situations réelles rencontrées dans l'industrie aéronautique, automobile et micro-électronique ont été mises en évidence. Les éléments de microstructure ont des tailles du même ordre de grandeur que certaines parties de la structure, ou bien les structures sont soumises à de forts gradients de sollicitation. Des exemples de structures composites montrent qu'il n'est plus pertinent d'utiliser les propriétés effectives obtenues par homogénéisation classique. On propose de remplacer la structure à gros grains par un milieu homogène de substitution généralisé. La prise en compte des correcteurs selon la méthode des développements asymptotiques multiéchelles permet de construire un milieu effectif du second gradient et de calculer les valeurs des propriétés élastiques supplémentaires apparaissant dans la théorie. On a étendu cette approche au cas thermoélastique pour justifier les lois de comportement linéaires obtenues pour un milieu du second gradient par l'approche thermomécanique macroscopique.

Une méthode basée sur des développements polynomiaux est proposée pour construire un milieu micromorphe ou de Cosserat de substitution à partir d'un milieu continu classique hétérogène. Elle définit clairement les degrés de liberté supplémentaires en fonction de certaines moyennes sur le champ de déplacement local. Elle spécifie aussi le problème aux limites, avec des conditions aux limites non homogènes, à résoudre sur une cellule de base d'un milieu périodique par exemple pour calculer les propriétés effectives supplémentaires. L'amélioration apportée par cette méthode pour décrire la réponse de structures à gros grains est illustrée pour quelques structures composites, notamment multicouches. L'avantage de cette formulation réside dans le fait qu'elle peut être appliquée quel que soit le type de comportement mécanique au sein de la microstructure.

Si l'on accepte de voir dans le monocristal élastoplastique un milieu de Cosserat, alors le polycristal est un milieu continu généralisé hétérogène, et des méthodes d'homogénéisation spécifiques doivent être développées pour prévoir ses propriétés macroscopiques. La méthode des développements asymptotiques a été utilisée pour homogénéiser les milieux de Cosserat et micromorphes. Il apparaît que plusieurs cas sont possibles, suivant la façon dont évoluent les longueurs caractéristiques impliquées dans ces modèles lorsque le petit paramètre géométrique  $\varepsilon = l/L_\omega$  tend vers zéro. On peut trouver au niveau macroscopique un milieu classique, de Cosserat, micromorphe ou d'autres cas particuliers.

Le problème aux limites sur la cellule de base périodique d'un milieu de Cosserat hétérogène a été utilisé pour prévoir la réponse d'un monocristal de superalliage à base de nickel durci par précipitation cohérente dont chaque phase est décrite par un milieu de Cosserat. Le modèle permet par homogénéisation périodique de décrire simultanément l'effet de fraction volumique et de taille de précipité. Il a été aussi appliqué au calcul d'agrégats polycristallins périodiques pour rendre compte au niveau macroscopique de l'effet de taille de grains, dit de Hall et Petch, pour des structures cristallines cubiques à faces centrées et hexagonales compactes.

Le problème de l'inclusion d'Eshelby et de l'hétérogénéité élastique a été étudié dans le cas de milieux de Cosserat et micromorphes. Pour des inclusions grandes par rapport aux longueurs caractéristiques des constituants, le résultat coïncide avec la solution classique. Pour une inclusion dure par exemple, on trouve que la contrainte moyenne en son sein augmente lorsque sa taille diminue jusqu'à une saturation pour des inclusions plus petites que les longueurs caractéristiques en jeu. Dans le domaine de transition, la déformation n'est pas homogène dans l'inclusion. Ces effets de taille ont été utilisés pour modéliser la présence de trous dans des mousses métalliques représentées par un milieu continu.

## **Éléments de calcul de microstructures**

Le calcul de microstructures combine les méthodes numériques du calcul des structures et les connaissances en sciences des matériaux, et a pour objectifs

- *la compréhension des mécanismes locaux de déformation* à l'œuvre au sein des matériaux hétérogènes, au niveau des hétérogénéités individuelles : incompatibilités de déformation entre grains voisins d'un polycristal, concentrations de contraintes dans un matériau composite...
- *le calcul de composants industriels* dont la taille est du même ordre de grandeur que celle des hétérogénéités présentes ou en présence de forts gradients de sollicitation (structures à gros grains).
- *la prévision des propriétés effectives des matériaux hétérogènes*. On est en droit d'utiliser le calcul de microstructures comme méthode d'homogénéisation numérique. Lorsque les propriétés des constituants sont très contrastées ou lorsque l'on est confronté à des chargements macroscopiques complexes (multiaxial, changements de trajets de chargement, comportement cyclique...), le calcul direct de microstructures peut très bien s'avérer être la seule solution fiable au problème de l'estimation des propriétés effectives.
- *la simulation des mécanismes locaux d'endommagement*. L'initiation de l'endommagement dans un matériau n'est pas pilotée par des valeurs moyennes de contraintes ou déformations par phase, que les techniques d'homogénéisation sont souvent en mesure d'estimer, mais bien plutôt par certaines valeurs maximales atteintes localement au sein de la microstructure hétérogène (près des joints de grain ou des interfaces...).

Pour cela, on a réuni des moyens de calculs (méthodes des éléments finis en non linéaire, maillage de microstructures, calcul parallèle...), des images tridimensionnelles de matériaux réels (obtenues par microscopie confocale ou par tomographie aux rayons X) ou virtuels (modèles aléatoires issus de la morphologie mathématique) et des lois de comportement local appropriées.

Une question centrale en homogénéisation numérique est la définition d'un Volume Élémentaire Représentatif. On a proposé une démarche statistique et numérique permettant d'aboutir à une estimation quantitative de la taille du VER. Il apparaît qu'on ne peut pas parler d'une seule taille de VER mais bien plutôt de tailles de VER qui dépendent des paramètres suivants : la propriété morphologique ou physique elle-même (fraction volumique, élasticité, thermique...), la précision souhaitée pour l'estimation de la propriété effective étudiée, la morphologie et la fraction volumique des phases, le contraste de propriétés entre les phases, les conditions aux limites (homogènes au contour ou périodiques) et enfin le nombre de réalisations de la microstructure consenti pour les calculs. Une conclusion majeure du travail est que les conditions aux limites périodiques permettent d'accéder aux propriétés effectives pour des volumes relativement petits de matériau à condition toutefois de consentir à un nombre suffisant de réalisations de la microstructure.

Les calculs d'agrégats polycristallins ont permis de mettre en évidence les niveaux d'hétérogénéité considérables au sein des grains d'un volume déformé. On propose de les utiliser pour valider et/ou identifier des modèles simplifiés d'homogénéisation.

Une étude des revêtements multicristallins de tôles d'acier galvanisées a permis de mettre en évidence les possibilités du calcul de microstructures. Elle prévoit la multiaxialité des contraintes dans les grains, l'activation des systèmes de glissement et de maillage, les gradients de déformation se développant de l'interface à la surface libre, la rugosité induite par la plasticité, et enfin l'amorçage de l'endommagement par clivage ou rupture intergranulaire. Une première modélisation a été proposée pour la formation et la propagation de macles au sein de grains isolés.

Enfin, une étude systématique du comportement des mousses métalliques à porosité ouverte (mousses de nickel) et fermée (mousses d'aluminium) a été entamée. On a montré l'intérêt des modèles de plasticité compressible pour modéliser leur comportement macroscopique. L'accent a été mis sur la simulation des phénomènes de localisation de la déformation lors de la compression de mousses d'aluminium. L'imagerie

tridimensionnelle par tomographie est utilisée ensuite pour parvenir à une démarche prédictive permettant de prévoir les propriétés macroscopiques en fonction de celles du métal de base et de la structure de la mousse.

Le calcul de microstructures est un thème fédérateur permettant de mettre à contribution les compétences des laboratoires concernés. En particulier, la mécanique des milieux continus généralisés en est devenue une brique de base pour la prise en compte des effets d'échelle. La démarche future utilisera le calcul de microstructure en vue d'une approche locale de la fatigue et plus généralement de l'amorçage et propagation de l'endommagement.

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

#### Séminaires

S. Forest, *Calcul de multi et polycristaux métalliques*, Université des Sciences et Technologies de Lille, Laboratoire de Structure et Propriétés de l'Etat Solide, 15th march 2002.

S. Forest, *An introduction to microstructural mechanics*, seminar at Department of Applied Physics, Prof. E. van der Giessen and de Hosson, University of Groningen, The Netherlands, 18th december 2001.

G. Allaire, S. Forest and L. Kubin, séminaire Ile-de-France-Sud, sur le thème *Approches multiéchelles en mécanique des solides*, coordonné par P. Gilormini et A. Zaoui, 6-12-2001, Cachan.

S. Forest, *Mécanique des milieux continus et matériaux hétérogènes* :

- LEMTA - ENSEM, Nancy, 10 mai 2001
- LMM, Université Paris VI, 23 mars 2001
- Journée Modélisation du comportement et de la résistance des liaisons et des assemblages mécaniques, ONERA, 22 mars 2001.

S. Forest, *Introduction au calcul de microstructures*, CEA, Bruyères-le-Châtel, juin 2000.

S. Forest, *Modelling size effects in crystalline materials*, Institut für Werkstoffwissenschaften, Universität Erlangen - Nürnberg, Erlangen, Germany, february 1999.

S. Forest, *Modélisation des effets de taille de grain dans les polycristaux métalliques*, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 30 octobre 1998.

#### Groupes de travail

T. Kanit, S. Forest, D. Jeulin, *Détermination du Volume Élémentaire Représentatif des matériaux aléatoires : approche statistique*, GT Mécamat Approches probabilistes en mécanique des matériaux, organisé par P. Franciosi, D. Jeulin et F. Montheillet, INSA, Lyon, 31 mai 2001.

S. Forest, *Generalized Continuum Modelling of Heterogeneous Materials*, 3. Humboldt - Seminar und Arbeitskreis Stoffgesetze, organisé par A. Bertram, H. Altenbach et J. Olschewski, Magdeburg, RFA, 26-27 mars 1999.

S. Forest, R. Dendievel, G. Canova, *Éléments d'homogénéisation des milieux de Cosserat : Du monocristal de Cosserat au polycristal?*, Journées thématiques Simulations numériques en Mécanique Physique, GDR 1165, organisées par L. Kubin, Villeteuse, 9-10 janvier 1997.

S. Forest, P. Pilvin, *Modélisation à l'aide d'un modèle polycristallin du comportement et de l'évolution de texture du cuivre pour des trajets de chargement complexes*, Réunion de travail de la Commission Texture et Anisotropie de la SF2M, organisée par C. Esling et R. Penelle, laboratoire Léon Brillouin, Saclay, 12-13 Décembre 1996.

S. Forest, *Modelling the cyclic behaviour of two-phase single crystal superalloys*, Arbeitskreis Stoffgesetze (Olschewski, Berlin) en commun avec DGM-Arbeitskreis Mechanisches Werkstoffverhalten bei hohen Temperaturen (Eggeler, Bochum) et DGM-Fachausschuss Computersimulation (Raabe, Aachen), RWTH Aachen, 18-10-1996.

### **Organisation de séminaires et de groupes de travail**

*Mechanical properties of ice : from South Pole to ice creams*, autour des exposés de S. Singleton (Unilever Research - England), T. Kanit (ENSMP), A. Philip (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement - Grenoble) et Ph. Mansuy (LGGE - Grenoble), 8th december 2000.

*Mécanique et mécanismes des matériaux à longueur(s) interne(s)*, groupe de travail MECAMAT animé avec J.-F. Ganghoffer (LEMMA-Nancy) :

- Effets d'échelle en plasticité cristalline : mono- et polycristaux métalliques, Ecole Centrale de Paris, 1 et 2 octobre 2001.

- Mousses métalliques et autres matériaux enchevêtrés, GPM2-INPG, Grenoble, 6-7 avril 2000.

- Panorama de la mécanique des milieux continus généralisés, Ecole des Mines de Paris, 31 mai et 1 juin 1999.

*Matériaux enchevêtrés et milieux de Cosserat* : à l'occasion de la visite de Martin Ostoja Starzewski (Institute of Paper Science & Technology, and Georgia Institute of Technology Atlanta, U.S.A.), avec D. Jeulin, mars 1999.

*Plasticité des agrégats polycristallins* : atelier franco-allemand, avec des exposés de A. Bertram (Universität Magdeburg) et J. Schröder (Universität Stuttgart), février 1999.

### **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.

*Advanced modelling of heterogeneous materials: homogenization and generalized continua* session de ESMC5 (Fifth Euromech Solid Mechanics Conference), organisée avec H. Askes, E. Busso, M. Geers, B. Sluys, P. Steinmann : 22 exposés oraux, Salonique (Grèce), août 2003.

*Scale transitions from atomistics to continuum plasticity*, 5th Euromech-Mécamat European Mechanics of Materials Conference, EMMC5, Delft, The Netherlands, membre du comité d'organisation et responsable de l'édition des proceedings, 5-8 Mars 2001, *J. Phys. IV*, Vol. 11, Pr. 5, 2001.

*Heterogeneous materials and generalized continua* : session de ESMC4 (Fourth Euromech Solid Mechanics Conference), organisée avec Dr. R. Sievert (BAM - Berlin) : 10 exposés oraux + 15 posters, Metz, juin 2000.

*Matériaux poreux et mousses : élaboration, structures et propriétés*, symposium organisé par Y. Bienvenu, P. Bompard et S. Forest pour les Journées d'Automne de la SF2M, Paris, 1998.

Membre du comité d'organisation de 2nd European Mechanics of Materials Conference on *Mechanics of Materials with Intrinsic Length Scale*, EMMC2, Magdeburg, Germany, 23-26 february 1998.

*Local strain and temperature measurements in non-uniform fields at elevated temperatures*, Proceedings of the International Symposium held at Berlin, Germany, 14-15 March 1996, edited by J. Ziebs, J. Bressers, H. Frenz, D.R. Hayhurst, H. Klingelhöffer and S. Forest, Woodhead Publishing Limited, 1996.

## 4 Visites et séjours dans d'autres laboratoires

Six semaines à l'Institut für Theoretische Physik, TU Berlin (RFA), chez le Professeur W. Muschik, juin–juillet 2003

Une semaine à l'Aristotle Technical University, Thessaloniki, Greece, dans le groupe du Professeur E.C. Aifantis, janvier 2001.

Séjour de 3 jours au laboratoire Partielle Differentialgleichungen und anwendbare Analysis de l'université technologique de Darmstadt, invitation du professeur Hans-Dieter Alber (Fachbereich Mathematik), november 1999.

Séjour d'une semaine au laboratoire de Mécanique de l'Université Otto-von-Guericke à Magdeburg (RFA, Décembre 1997) comme scientifique invité.

Séjour d'un an au Bundesanstalt für Materialprüfung und Forschung (BAM - Berlin), dans le cadre du projet européen BRITE "Development of Microstructure Based Viscoplastic Models for an Advanced Design of Single Crystal Hot Section Components", 1994-1995.

## 5 Enseignement

### Thèses encadrées

**Marie-Dominique Dupuits** (40% coencadrement M. Boussuge, soutenue, juin 1998) : *Etude expérimentale et modélisation du comportement d'un matériau de joint de culasse pour application automobile*, en collaboration avec (RENAULT).

**Jean-Marc Cardona** (50% coencadrement G. Cailletaud, soutenue, 20 décembre 2000) : *Comportement et durée de vie des pièces multiperforées : application aux aubes de turbine* (partenaire SNECMA).

**Fabrice Barbe** (40% coencadrement G. Cailletaud, soutenue, 22 décembre 2000) : *Modélisation du comportement mécanique d'agrégats polycristallins*.

**Pascal Boubidi** (20% coencadrement G. Cailletaud, soutenue, 18 décembre 2000) : *Experimental characterization and numerical modelling of low cycle fatigue in a nickel base single crystal superalloy under multiaxial loading*, thèse européenne en liaison avec le BAM-Berlin (BRITE-EURAM PROJECT).

**Rodolphe Parisot** (50% coencadrement A. Pineau, soutenue 5 avril 2001) : *Microstructure, déformation et endommagement d'un revêtement de zinc sur tôle d'acier*, avec le partenaire (SOLLAC).

**Jean-Sébastien Blazy** (50% coencadrement Y. Chastel (Cemef), soutenue le 25 avril 2003), *Comportement mécanique des mousses d'aluminium : caractérisations expérimentales sous sollicitations complexes*



*et simulations numériques dans le cadre de la l'élasto-plasticité compressible*, partenaire industriel **RENAULT**.

**Toufik Kanit** (50% coencadrement D. Jeulin (Morphologie Mathématique), soutenue le 12 mai 2003), *Notion de volume élémentaire représentatif pour les matériaux hétérogènes : approche numérique et statistique*, partenaire industriel **UNILEVER**.

**V. Goussery** (30% coencadrement Y. Bienvenu), soutenue le 2 mars 2004, *Caractérisations microstructurale et mécanique de mousses de nickel à cellules ouvertes pour batteries de véhicules hybrides*, (partenaires industriels **NITECH, INCO**).

**Thierry Dillard** (60% coencadrement Y. Bienvenu), soutenue le 4 mars 2004, *Caractérisation et simulation numérique du comportement mécanique des mousses de nickel : morphologie tridimensionnelle, réponse élastoplastique et rupture*, (partenaire industriel **NITECH**).

Depuis octobre 2000, 60% coencadrement avec L. Rémy, de la thèse de Sylvain Flouriot sur le sujet : *Simulation de la fissuration en fatigue dans les superalliages à base de nickel monocristallins* (partenaire industriel **SNECMA**).

Depuis octobre 2002, 30% coencadrement avec J.-L. Strudel et C. Prioul de la thèse de Stéphanie Graff sur le sujet : *Simulation des instabilités de type Portevin-Le Châtelier, application aux anomalies de comportement viscoplastique du zirconium*, thèse **CEA-CNRS, CPR SMIRN**.

Depuis octobre 2002, 50% coencadrement avec Luc Rémy de la thèse de Nicolas Marchal sur le sujet : *Fissuration à haute température de superalliages monocristallins à base de nickel*, dans le cadre du projet européen Growth **SOCRAX**.

Depuis octobre 2002, 50% coencadrement avec M. Boussuge de la thèse de Kamel Madi sur le sujet : *Caractérisation et simulation du comportement viscoplastique de réfractaires électrofondus à partir de leur microstructure*, (partenaire industriel **SAINT-GOBAIN**).

Depuis octobre 2002, 80% coencadrement avec A.-F. Gourgues de la thèse de Asmahana Zéghadi sur le thème : *Modélisation et simulation de quelques effets d'échelle dans le comportement élastoplastique des aciers*, (partenaire **ARCELOR**).

### **Participation à des jurys de thèses**

(autres que les thèses coencadrées)

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.

Arnaud Fazékas, *Etude de l'influence des dispersions microstructurales sur les propriétés des matériaux cellulaires*, D. Caillerie, R. Dendievel, A. Mortensen, K. Sab, L. Salvo, INPG, Grenoble, 17 décembre 2003.

Fabien Onimus, *Approche expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des alliages de zirconium irradiés*, J.-L. Béchade, Y. Bréchet, X. Feaugas, S. Leclercq, C. Lemaignan, J.-P. Mardon, P. Pilvin, C. Prioul, Ecole Centrale de Paris, 8 décembre 2003.

Anthony Nouy, *Une stratégie de calcul multiéchelle avec homogénéisation en temps et en espace pour le calcul de structures fortement hétérogènes*, H. Ben Dhia, M. Geers, P. Alart, D. Guedra–Degeorges, P. Ladevèze, P. Verpeaux, ENS Cachan, 5 décembre 2003.

Maud Baudequin, *Identification des mécanismes physiques mis en jeu lors de la reprise d'épaisseur de la laine de verre*, P. Castera, E. Charlaix, P. Boch, F. Cantelaube, S. Forest, S. Roux, G. Ryschenkow, Doctorat en Sciences des Matériaux, Paris VI, 11 janvier 2002.

Philippe Mansuy, *Contribution à l'étude du comportement viscoplastique d'un multicristal de glace : hétérogénéité de la déformation et localisation, expériences et modèles*, D. Favier, S. Forest, D. Guéguen, J. Meyssonier, A. Philip, E. Rauch, C. Rey, Doctorat UJF Géophysique Géochimie, Grenoble, 2 février 2001.

Olaf van der Sluis, *Homogenisation of structured elastoviscoplastic solids*, F.P.T. Baaijens, W.A.M. Brekelmans, I. Doghri, S. Forest, M. Geers, E. v. d. Giessen, H.E.H. Meijer, M.A.J. Michels, P.J.G. Schreurs, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 15th January 2001.

Natacha Le Coq–Buannic, *Analyse asymptotique de poutres élastiques hétérogènes*, O. Desbordes, F. Léné, J.M. Viano–Rey (rapporteurs), P. Cartraud, S. Forest, B. Peseux, T. Quesnel, J. Simmonds, C. Wielgosz, Ecole Centrale de Nantes, Nantes, 10 novembre 2000.

Christophe Lemarchand, *De la dynamique des dislocations à la mécanique des milieux continus : développement et application d'une simulation micro-macro*, jury composé de K. Saanouni, C. Teodosiu (rapporteurs), R. Billardon, B. Devincere, F. Léné (examineurs), J.L. Chaboche, S. Forest (membres invités), Université P. et M. Curie, Paris, 16 novembre 1999.

Jean-Luc Hanus, *Contribution à l'étude de la localisation des déformations dans des matériaux et structures élasto-(visco)-non-linéaires*, examinateur, jury composé de A. Benallal, Y. Berthaud (rapporteurs), A. Cimetière, T. Désoyer (dir. de thèse), A. Dragon, S. Forest, Q.S. Nguyen, G. Rousselier, P. Villechaise, Université de Poitiers, 5 novembre 1999.

## **Encadrement de stagiaires**

Stéphanie Graff, *Simulation du vieillissement dynamique dans les alliages d'aluminium*, DEA Métallurgie et Matériaux, février–juillet 2002.

Jérôme Declercq, *Modélisation du comportement élastoviscoplastique d'une chambre de combustion multiperforée*, Mastère Comportement des Matériaux et Dimensionnement des Structures, partenaire SNECMA, février-septembre 2001.

Alexandra Marie-Louise, *Statistique de rupture de mousses d'aluminium*, DEA Mécanique et Matériaux, partenaire Renault, janvier-juin 2001.

Alexis Demongeot, *Modélisation des phénomènes de localisation dans des monocristaux de glace*, DEA Mécanique et Matériaux, avril-juin 2000.

Yassine El Ouarzazi, *Prédiction des propriétés mécaniques de crèmes glacées*, stage de 3ème année de l'Ecole des Mines, janvier-juin 2000.

Xavier Badiche, *Comportement électrique et mécanique des mousses de nickel*, stage de 3ème année de l'Ecole des Mines, janvier-juin 1999, prix Jules Garnier de la SF2M 1999.

Valéry Ferreira, *Comportement mécanique du zinc utilisé pour le revêtement de tôles galvanisées*, DEA S3M, Paris VI, avril-août 1999.

Encadrements de stages de mécanique et matériaux dans le cadre de la formation des élèves du Corps des Mines :

- Jean Huby et Nicolas Imbert (1999), Jean-André Barbosa et Thomas Joindot (1998) : *caractérisation et modélisation du comportement mécanique du superalliage monocristallin CMSX4 à 700°*.
- Mélanie Delots et Lucile Loiseau (2000) : *Comportement mécanique des mousses de nickel*.

Eflam Hudry, *comportement mécanique en compression des mousses d'Aluminium*, mastère de Mise en Forme des Matériaux, CEMEF, Sophia - Antipolis, co - encadrement avec Y. Chastel, juin 1998.

Frédéric Bultel, stage de DEA Solides, Structures et Systèmes mécaniques (Paris VI et Ecoles associées) : *"Elastoplasticité des milieux de Cosserat"*, juin 1997 (6 mois)(DEA obtenu avec mention Très Bien).

Christophe Bourgin, encadrement d'un stage de fin d'études d'ingénieur de l'Ecole des Mines de Paris : *"Comportement métallique de mousses de nickel"*, juin 1997 (1 an).

Martial Giton, stage de fin d'études au **CESTI** (coencadrement P. Pilvin), *Caractérisation expérimentale et modélisation du comportement mécanique du tantale polycristallin*, juin 1997.

Thibaud Guibert, stage du DEA Mécanique et Matériaux (Lille) : *"Modélisation de l'effet d'une prédéformation sur les propriétés en fatigue de tôles minces dans le domaine de l'endurance"*, juin 1996 (6 mois).

Responsable de mini-projets d'option dans le cadre du DEA *"Mécanique et Matériaux"* (quatre stagiaires, février-mars 1994, 1996 et 1997, sujets: grandes déformations, milieu de Cosserat élastique et élastoplastique).

Responsable d'un stage d'application du cours de l'Ecole Polytechnique *"Thermodynamique des Matériaux"* (deux stagiaires, juin 1994).

## **Cours dispensés**

DEA *Mécanique et Matériaux*, Module *Matériaux hétérogènes*, Eléments de calcul de microstructures (cours 3h), mars 2001.

DEA *Modélisation et Simulation en Sciences des Matériaux : de la Molécule à la Structure*, Université de Marne-la-Vallée :

- Tronc commun : Comportement macroscopique des Matériaux (15h, 2000, 2001,2002);
- Option *Modélisation et simulation des matériaux à l'échelle macroscopique : rhéologie et transport* : cours de *Modélisation des phénomènes de localisation dans les solides élastoplastiques* (3h).

Cours de *Lois de comportement Matériaux et méthodes numériques associées*, 3ème année de l'ENSIETA, Brest, (14h), 1999.

TD du Cours de *Mécanique des matériaux solides* du Prof. G. Cailletaud en première année du cycle ingénieurs civils de l'Ecole des Mines de Paris en 1996–2001 (16h).

Semaine d'enseignement spécialisé *Mécanique des Solides Inélastiques* (1997, 1999, 2001) : cours *Lois de comportement inélastiques en transformations finies* (3h) et mini-projets de calcul par éléments finis en non-linéaire.

Cours de *Introduction à la plasticité et à la viscoplasticité*, DEA Métallurgie et Matériaux (12h), 1996, 1997, 1998.

Cours *Lois de comportement en transformations finies*, DEA Mécanique et Matériaux (Paris), (Février 1999, 2000, 3h).

Cours *Echelles et transitions d'échelles en mécanique physique*, DEA Mécanique et Matériaux (Paris), (Février 1997, 3h).

Cours de *Grandes Déformations du Polycristal*, DEA Mécanique et Matériaux (Février 1996, 3h).

### **Formations continues**

*Mécanique non linéaire des matériaux : comportement, endommagement et méthodes numériques*, J. Besson, G. Cailletaud, J.L. Chaboche et S. Forest, formation IPSI, 16-19 septembre, Paris, 1997.

Participation à trois formations continues d'une semaine organisées par l'Ecole des Mines (travaux pratiques, 1992, 1993, 1996)

## **6 Compléments de formation**

Participation en tant qu'élève aux Ecoles suivantes :

*Mechanics of random and multiscale microstructures*, organisée par D. Jeulin et M. Ostoja-Starzewski, CISM, Udine, 25-29 septembre 2000.

*Méthodes d'homogénéisation en mécanique des matériaux*, Ecole thématique du CNRS, Lalonde-les-Maures, 25 août-4 septembre 1998. (+ j'y ai donné un séminaire d'une heure sur le thème *Homogénéisation et milieux continus généralisés*).

## **7 Contrats avec l'Etat et l'industrie**

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

membre du GDR *Mousses Solides*, CNRS 2002.

Programme Matériaux CNRS 2001, Approches multiéchelles des propriétés macroscopiques des matériaux de structure. Projet : *Comportement mécanique de composites à nano-renforts flexibles* coordinateur Rémy Dendievel (membres UMR 5010, 5510, 5301, 7633).

T. Kanit, S. Forest, V. Mounoury, D. Jeulin, *Determination of a representative volume element for random microstructures : application to waterice products*, convention Unilever-Armines, No. SRA1.3/PS00085, responsable du contrat à 50%, juin 2000.

J. Olschewski, R. Sievert (Berlin), B. Svendsen (Dortmund), S. Forest (Evry), projet DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) : Beschreibung des Verfestigungsverhaltens metallischer Werkstoffe unter dem

Einfluss stark inhomogener Verformung zur Berechnung des Fortschritts makroskopisch grosser Risse unter zyklischer Belastung, responsable du contrat à 20%, 1999–2001.

Projet Performances du Ministère de l'Industrie : *Mousses de Nickel ductiles pour batteries rechargeables et autres applications de haute technologie MONICKE*, partenaires NiTECH, HEF et ENSMP, responsable du contrat à 50% (avril 2000, 3 ans).

Les thèses encadrées sont associées à des contrats industriels dont les partenaires sont : SNECMA, SOLLAC, RENAULT, SAINT-GOBAIN etc.

Des contrats à durée plus limitée ont concerné l'IRSID, le CEA (Valduc) et NiTECH (Saint-Chamond).

Deux projets (1997, 1999) ont été soutenus par l'ANVAR.

## 8 Contrats européens

Membre du 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, Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik Freiburg (RFA), Eötvös University Budapest, contract No. MRTN-CT-2003-504634, 2004–2008.

Membre du 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.

Membre du 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.

## 9 Divers

### Opérations de communication vers l'industrie ou le grand public

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.

*Le Journal de la Délégation Ile-de-France Est*, dossier Recherche et Automobile, numéro 1, octobre 2002 (<http://www.ftpress.com/interest/lettre/lettre01.html>)

Science en Fête 1999, Cité des Sciences et de l'Industrie, participation à un débat pour répondre aux questions de 100 élèves de CM1/CM2 (22 octobre 1999).

### Comités

Membre du comité de réflexion sur la refonte de l'enseignement des Ingénieurs Civils de l'Ecole des Mines de Paris (6 membres), 2001.

Organisateur avec M. Bellet (Cemef - Sophia - Antipolis) d'un groupe de réflexion sur l'enseignement de la Mécanique et des Matériaux dans le Cycle Ingénieurs Civils de l'Ecole des Mines de Paris.

Membre du Bureau du Département Sciences Physiques de l'Ingénieur de l'Ecole des Mines de Paris.

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-.

Membre du Conseil de Laboratoire du Centre des Matériaux de l'ENSMP - UMR 7633 - 1996-1999.

### **Expertise d'articles de revues internationales**

Acta Materialia	4
Aerospace Science and Technology	1
Comptes Rendus à l'Académie des Sciences	2
Computational Materials Science	2
Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering	1
Continuum Mechanics and Thermodynamics	1
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	5
Journal of Engineering Manufacture	2
Journal of the Mechanics and Physics of Solids	1
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	1

## 10 Annexe

### Résumés des thèses encadrées



#### IDENTIFICATION EXPERIMENTALE ET MODELISATION DU COMPORTEMENT ELASTOVISCOPLASTIQUE DU JOINT DE CULASSE : DES ESSAIS MECANQUES AU CALCUL DE COMPOSANT

Marie-Dominique Dupuits-Rey

Encadrement : Michel Boussuge, Samuel Forest

soutenue en juin 1998

jury : R. Billardon, H. Burlet, J.-L. Chaboche, N. El Mayas, J.-L. Lataillade, C. Wielgosz

Comprimé entre la culasse et le bloc moteur, le joint de culasse (j.d.c.) a pour fonction d'assurer l'étanchéité aux différents fluides circulant dans le moteur : gaz de combustion, huile et liquide de refroidissement. Les sollicitations correspondantes étant très diverses (pression, température, nature du fluide), la solution retenue à ce jour est un multimatériau sandwich métal-polymère, localement ouvragé autour des alésages.

En vue de représenter les sollicitations réelles que le j.d.c. rencontre dans le moteur, nous avons développé et effectué des essais de compression à plusieurs températures, de compression-cisaillement et, enfin, de compression non-uniforme. Les réponses en contrainte-déformation présentent une non-linéarité et une hystérèse indépendantes de la vitesse de sollicitation. Au fur et à mesure que l'on cycle entre deux niveaux de charge, la déformation cumulée progresse et le comportement tend à se stabiliser. Par ailleurs, un effet du temps a été mis en évidence grâce à des essais de fluage-recouvrance.

Dans une approche phénoménologique, un modèle uniaxial multi-mécanismes a été développé, avec une composante plastique pour traduire l'ouverture des boucles indépendante du temps et une composante viscoplastique pour simuler le fluage. Enfin, la non-linéarité en contrainte-déformation, a été traduite grâce à une formulation hypoélastique de la déformation réversible et une plasticité sans seuil avec une contrainte interne fonction de la déformation inélastique. La formulation 3D du modèle a ensuite été construite et implémentée dans un code de calcul par éléments finis pour réaliser des calculs de structure. La loi de comportement a été validée grâce à la confrontation avec les résultats expérimentaux d'un essai de compression non-uniforme.

Enfin, un calcul réalisé sur un maillage de j.d.c. avec des conditions de chargement représentant les tensions des goujons lors du serrage a prouvé l'applicabilité du modèle à un cas industriel réel.

## EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION AND SIMULATION OF THE ELASTOVISCOPLASTIC BEHAVIOUR OF A CYLINDER HEAD GASKET : FROM MECHANICAL TESTING TO STRUCTURAL COMPUTATIONS

Clamped between the cylinder head and the cylinder block, the cylinder head gasket (C.H.G.) must ensure water, oil and gas tightness. It is subjected to various types of thermomechanical loading conditions : prescribed pressure, inhomogeneous temperatures and reactions with fluids and gas. That is why the C.H.G is a multimaterial sandwich metal - polymer.

In order to represent actual loading conditions encountered in the engine, compressive loading at different temperatures, mixed compressive / shear and non uniform compressive loading experiments have been developed and performed. The recorded strain/stress curves are non linear and display loops that are almost stress rate independant. During cycling, the total deformation increases and the response stabilizes. Besides, creep-recovery tests reveal a viscoplastic behaviour.

Within a phenomenological approach, a multi-mechanism model has been developed with a plastic strain to describe time independant hysteresis loops and a viscoplastic strain to simulate creep. The plastic mechanism admits a vanishing threshold and a non linear kinematic hardening variable. The stress is computed using an elastic on hypoelastic constitutive relation.

A three-dimensional formulation of the model has been implemented in a finite element code in order to perform structural computations. The constitutive model has been validated with the comparison with experimental results of a non uniform compressive loading test, and finally applied the real industrial component.





EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION AND NUMERICAL MODELLING OF LCF FATIGUE IN A NICKEL BASE SINGLE CRYSTAL SUPERALLOY UNDER MULTIAXIAL LOADING

Pascal BOUBIDI

Directeurs de thèse : G. Cailletaud, S. Forest

soutenue le 18 décembre 2000

jury : E. Busso, S. Kruch, R. Sievert, H.-D. Bui, J.-Y. Guédou, J. Olschewski, L. Rémy

The life prediction of single crystal components was studied in this work through an experimental approach and numerical modelling. It has been observed that a good evaluation of the life must include both a crack initiation model and a prediction of the crack propagation.

The main contribution of the thesis deals with crack initiation: a huge experimental data base on SC16 has been made, and two original approaches have been proposed for the simulation of the tests. Most of the tests performed in the study are unique in the literature, specially the section concerning the notched specimens with  $\langle 001 \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$  and  $\langle 111 \rangle$  crystallographic orientations. Several notched radii and orientations of the material have been used. Metallurgical observations have been made to characterize crack location and the rupture mode.

The simulation section includes first the identification of the material parameters for a crystallographic model valid for non isothermal cyclic loadings, in the complete temperature range, a special attention being paid to 950°C. The same set of coefficients is valid for monotonic loadings, including creep, and cyclic loadings with or without hold periods, for all the crystallographic orientations tested, with either single or multiple slip.

This model was used to simulate isothermal LCF tests on circumferentially notched specimen using a FE technique. Crack initiation models can then be applied in a post-processor to achieve the life prediction. A new definition of the critical variable, based on the resolved shear stress, has been validated. On the other hand, it was observed from micrographs of the surface ruptures that the cracks initiate from casting pores present near the surface. An second approach, a statistical failure model taking account of the defects distribution in the life prediction, has been successfully applied too.

The methodology derived from the specimen observation is then tested on a “technological specimen” by the industrial partner, Siemens (KWU), simulating the most critical zone of a turbine blade. The classical procedures used in industry for life prediction are more and more questionable, due to the increasing complexity of the thermal and mechanical loading history. The FE model was taken from KWU, and the two previously defined assessment rules were successfully applied. Both lifetime and crack location given by the model were found in good agreement with experiment.

The last section of this work is a numerical study concerning the strain localisation patterns at the crack tip in f.c.c. single crystals under plane strain conditions at low temperature. This has to be seen as a first

step for a better understanding of the crack propagation process, having in view the competition between strain localisation models and fracture mechanics approach. Our contribution concerns the modification of the theoretical classical continuum mechanics results produced by the introduction of the generalized continuum theory. A Cosserat model for single crystal has then been used, for several orientations of a CT specimen, and was shown to predict a qualitatively different answer to the problem of strain localisation at a crack tip and to give pertinent explanations for crack branching after stable crack growth.

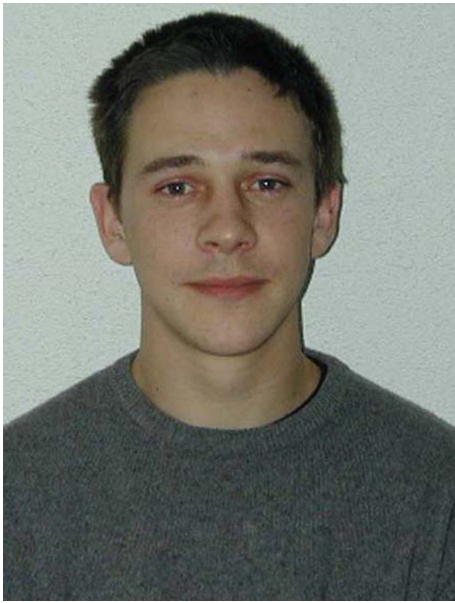
La durée de vie de structures monocristallines a été abordée selon une approche expérimentale et une modélisation numérique. Suite à des observations il s'avère qu'une satisfaisante détermination de la durée de vie doit inclure un modèle d'initiation et une prévision de la propagation de fissure.

La principale contribution de cette thèse concerne l'initiation de fissure: une importante campagne d'essais a été accomplie pour le SC16 et deux approches originales ont été mises en oeuvre pour leur simulation numérique. La plupart des essais effectués pendant cette étude, en particulier la partie traitant des essais sur éprouvettes entaillées avec les orientations cristallographiques  $\langle 001 \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$  et  $\langle 111 \rangle$ , constituent des résultats inédits. Plusieurs rayons d'entaille et orientations du matériau ont été testés. Des observations métallographiques ont permis de caractériser la localisation de fissure et le mode de rupture.

La partie simulation traite d'abord de l'identification des paramètres du modèle cristallographique valables pour des chargements cycliques anisothermes, couvrant un large intervalle de température, une attention particulière étant prêter à  $950^{\circ}\text{C}$ . Le même jeu de coefficients satisfait les chargements monotones (tension et fluage) et cycliques avec ou sans temps de maintien, pour différentes orientations cristallographiques, avec glissement simple ou bien multiple. Ce modèle a été utilisé pour simuler des essais isothermes LCF sur éprouvettes entaillées utilisant la méthode des Elements-Finis. Des modèles d'initiation peuvent alors être appliqués par des post-processeurs pour aboutir à la durée de vie. Une nouvelle définition de la variable critique, issue de la cission résolue, a été validée. Par ailleurs, il a été observé sur des micrographies de surfaces de rupture que les fissures s'initient à partir de pores présents au voisinage de la surface. Une seconde approche, un modèle de rupture statistique tenant compte de la distribution de défauts dans l'estimation de la durée de vie, a également été appliqué avec succès.

La méthodologie obtenue à partir de l'éprouvette de laboratoire a été testée sur une "éprouvette technologique" par le partenaire industriel, Siemens (KWU), simulant les zones les plus critiques d'une aube de turbine. Les méthodes classiques utilisées dans l'industrie pour la détermination de la durée de vie sont de plus en plus discutables, dû à la complexité croissante de l'histoire du chargement thermomécanique. A partir du modèle Element-Finis de KWU, on a montré que les deux méthodes précédemment définies présentent un bon caractère prédictif. La localisation de fissure et la prévision de la durée de vie obtenues à l'aide de ces modèles sont en bon accord avec les résultats expérimentaux.

La dernière partie concerne l'étude numérique des bandes de localisation de la déformation en pointe de fissure d'un monocristal en déformation plane et à basse température. Il s'agit d'une première étape pour une meilleure compréhension de la propagation de fissures, ayant en vue la compétition entre les modèles de localisation de la déformation et l'approche de la mécanique de la rupture. Notre contribution concerne la modification des résultats obtenus par la mécanique classique des milieux continus, produite par l'introduction de la théorie des milieux continus généralisés. Un modèle de Cosserat pour le monocristal a été utilisé, pour différentes orientations d'une éprouvette CT, et on a montré qu'il prévoit une solution qualitative différente au problème de localisation de la déformation en pointe de fissure et qu'il donne des explications pertinentes pour les bifurcations de fissure après propagation stable.



## MODELISATION DU COMPORTEMENT MECANIQUE D'AGREGATS POLYCRISTALLINS

Fabrice BARBE

Directeurs de thèse : G. Cailletaud, S. Forest  
soutenue le 22 décembre 2000

jury : M. Berveiller, J. Mendez, P. Pilvin, J. Ruste

Cette étude a été effectuée à la suite du développement de lois et d'outils applicables à la modélisation numérique du comportement élastoviscoplastique de matériaux cristallins : des lois de comportement de monocristaux, des lois de transition d'échelle pour les modèles d'homogénéisation, un code de calcul Eléments Finis adapté au calcul parallèle et un programme de génération de microstructures polycristallines 3D. Disposant de ces éléments, nous avons étudié le comportement de polycristaux 3D en petites déformations, aux échelles macroscopique, intergranulaire et intragranulaire.

Le milieu polycristallin est décrit par des polyèdres de Voronoï, donnés sous la forme d'un fichier de voxels (L. Decker, D. Jeulin, ENSMP). L'implémentation de la méthode FETI dans le code EF ZéBuLoN (F. Feyel, S. Quilici, ENSMP-ONERA) permet la résolution en parallèle de problèmes à très grand nombre de degrés de liberté. Ainsi nous avons accès à un nombre illimité de réalisations de microstructures et nous pouvons faire figurer suffisamment d'éléments dans un maillage pour que soit possible la description des champs intragranulaires dans un polycristal 3D.

Pour commencer nous montrons les spécificités de notre approche par rapport aux travaux de modélisation de la plasticité cristalline. La première partie de l'exploitation des outils a consisté à analyser la sensibilité des résultats aux données de la modélisation (nombre d'éléments, nombre de grains, réalisation de microstructure ...) afin d'établir une configuration de calcul valable pour des simulations sur un Volume Élémentaire Représentatif de polycristal isotrope. En seconde partie nous mettons en évidence l'hétérogénéité de comportement inter- et intragranulaire et l'apport de la méthode par rapport à une démarche autocohérente. Ceci est complété par une analyse de l'influence des joints de grain et des conditions aux limites sur la réponse d'un essai en traction simple, aux différentes échelles de la modélisation. Nous caractérisons ainsi un effet local et un effet moyen pour tous les grains, en fonction de la distance à un joint ou à un bord. En annexe sont donnés les résultats de simulations obtenus avec un modèle non-local des milieux de Cosserat (S. Forest, ENSMP) qui ont permis de quantifier un effet de taille de grain sur le comportement effectif de polycristaux.

This work results from the preliminary development of laws and tools for the numerical modeling of the elastoviscoplastic behavior of crystalline material: constitutive laws for single crystals, transition rules for homogenization methods, a finite element code with parallel computing abilities and a generator of 3D

polycrystalline microstructures. Having these tools in hands, we have performed a study of the behavior of 3D polycrystals under small strains, on the macroscopic, intergranular and intragranular scales.

The polycrystalline medium is described by maps of Voronoïpolyhedra given in the form of voxel files (L. Decker, D. Jeulin, ENSMP). So we can have use of as much 3D maps of polycrystals as we need. With the implementation of the FETI method into the FE code ZeBuLoN (F. Feyel, S. Quilici, ENSMP-ONERA), we can resort to parallel computing and solve problems with huge amount of degrees of freedom. With the discretization obtained, we can describe intragranular fields inside 3D polycrystals.

In the first part of the study, we have analysed how the results were sensitive to the input data of the modeling (number of elements, number of grains, microstructural realization ...). From this we could deduce an affordable computing configuration for the simulation of a Representative Volume Element of isotropic polycrystal. In the second part, attention has been focused on the inter- and intragranular heterogeneity predicted with FE, by comparison to that of a self-consistent model. To complete, we have studied the influence of grain boundaries and of the boundary conditions on the response of a tensile test, on the different scales of the modeling. We have thus characterized a local and a mean effect of the boundaries as a function of the distance to the boundaries under concern -either grain boundaries or the contour. Finally we present results of tensile test simulations performed in the framework of non-local mechanics of Cosserat media (S. Forest, ENSMP) from which a mean grain size effect could be measured.



COMPORTEMENT ET DUREE DE VIE DES PIECES  
MULTIPERFOREES :  
APPLICATION AUX AUBES DE TURBINE

Jean-Marc CARDONA

Directeurs de thèse : G. Cailletaud, S. Forest  
soutenue le 20 décembre 2000

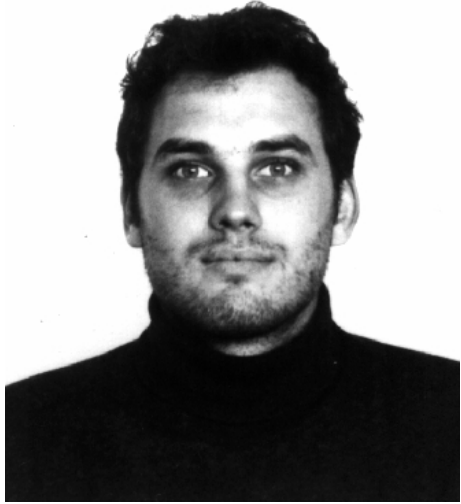
jury : E. Andrieu, C. Teodosiu, K. Sab, P. Gilormini, F.  
Gallerneau, F. Caruel, L. Lalaque

Les aubes de turbine HP sont des pièces soumises à des contraintes thermiques et mécaniques très fortes mais également variables dans le temps, d'où des phénomènes combinés de fatigue et de fluage. L'évolution technologique des matériaux, comme l'utilisation de matériaux monocristallins revêtus, permet d'acquérir une meilleure résistance au fluage et à la fatigue thermique mais n'est plus suffisante. Il a fallu intégrer des technologies de refroidissement interne de plus en plus complexes. Les microcanalisations sont un moyen efficace pour diminuer la température globale de la pièce mais créent des gradients thermiques et des concentrations de contraintes qui peuvent être à l'origine de l'amorçage de fissures. Par conséquent, afin d'étudier le comportement et la durée de vie des aubes de turbine HP, il est important de prendre en compte les singularités géométriques.

Un calcul d'aube multiperforée 3D a donc été réalisé en élasticité, en viscoplasticité isotrope et anisotrope dans des conditions isothermes et anisothermes. La réalisation de calcul de structure de cette taille n'est possible que depuis quelques années grâce à l'augmentation des puissances de calcul et à l'utilisation de calculateurs parallèles. Mais cette approche est toujours trop longue et n'est pas compatible avec les délais d'un bureau d'étude. De ce fait, une méthode de dimensionnement d'aube de turbine pour une utilisation quotidienne basée sur les méthodes d'homogénéisation a été proposée. Elle permet de remplacer la zone hétérogène (les trous du bord d'attaque) par un milieu homogène équivalent ayant des propriétés effectives. Ce dernier a été déterminé en élasticité en utilisant les méthodes d'homogénéisation classiques puis en viscoplasticité isotrope et dans le cas du monocristal en utilisant une méthode pragmatique. Les méthodes d'homogénéisation préconisées ont l'intérêt de comporter une étape de relocalisation permettant d'utiliser les informations du calcul simplifié pour appliquer des conditions aux limites adaptées sur une cellule représentative comportant un trou de refroidissement. Etant donné que le calcul de référence donne l'état de contraintes-déformations autour des trous, la prédiction donnée par la méthode de relocalisation pourra être évaluée sans ambiguïté.

Nous avons également mis en évidence les limites d'une telle approche dans le cas de forts gradients de sollicitations. Dans ces conditions de fonctionnement, les méthodes d'homogénéisation classiques sont mises en défaut et le milieu homogène équivalent peut être considéré comme un milieu continu généralisé. Une formulation en thermoélasticité du second gradient est proposée.

En parallèle, une étude expérimentale a également été réalisée à l'ONERA afin d'étudier l'influence de la perforation sur le comportement et la durée de vie. Des essais de fatigue thermomécaniques, prenant en compte les gradients thermiques observés sur la structure réelle, ont été réalisés jusqu'à rupture sur des éprouvettes monocristallines revêtues. Ces essais ont été simulés par éléments finis et un modèle de durée de vie en fatigue-fluage-oxydation a été appliqué en post-traitement du calcul de structure. De ce fait des comparaisons calcul-expérience au niveau du comportement et de la durée de vie ont pu être effectuées.



## MICROSTRUCTURE, DEFORMATION ET ENDOMMAGEMENT D'UN REVÊTEMENT DE ZINC SUR TOLE D'ACIER

Rodolphe PARISOT

Directeurs de thèse : S. Forest, A. Pineau  
soutenue le 5 avril 2001

jury : B. Bacroix, F. Delannay, X. Demonet, P. Drillet, J. Foct, F. Montheillet, P. Pilvin, J. Wegria

Les tôles d'acier galvanisées au trempé sont largement utilisées dans l'industrie automobile. Au cours des phases d'emboutissage, on constate parfois des pertes de revêtement de zinc qui, si elles n'ont pas d'incidences sur la protection cathodique du substrat ferritique, polluent les presses dont le nettoyage est long et coûteux. Au cours de ce travail, nous avons cherché à identifier les modes de déformation et d'endommagement qui sont préalables à toute perte de revêtement.

Les revêtements étudiés sont composés d'une couche de zinc monocristalline dans son épaisseur. Trois types de revêtements ont été étudiés: ils se différencient uniquement par leur microstructure. Le premier revêtement possède de gros grains ou grains "crêpes" qui ont une taille de 600 microns dans le plan de la tôle pour une épaisseur de 10 microns. Le second revêtement est identique au premier mais avec de nombreuses petites macles introduites par l'opération de skin-pass (un laminage de faible amplitude sur la tôle déjà revêtue). Le troisième revêtement étudié possède des petits grains, toujours monocristallins dans l'épaisseur, mais avec une taille dans le plan de la tôle réduite à 40 microns. Ce dernier revêtement a été obtenu à l'aide d'un traitement thermique de recristallisation pratiqué après le skin-pass. En plus de ces trois revêtements, on a étudié la déformation d'un zinc massif de composition identique à celle des revêtements.

Les modes de déformation ont été systématiquement analysés pour ces trois revêtements et ce pour des sollicitations de traction simple, de traction large et d'expansion équibiaxiale. Cette analyse repose sur une utilisation conjointe de l'EBSD (diffraction des électrons rétro-diffusés) et des moyens classiques de microscopie. Les résultats obtenus sont comparés avec ceux observés sur le zinc massif. Tandis que celui-ci se déforme par glissement basal, comme nous l'enseigne la bibliographie, les revêtements activent de nombreux systèmes de déformation et se déforment essentiellement par glissements non-basals et par maclage.

On montre que ce résultat surprenant n'est pas uniquement dû à la texture fortement basale des revêtements. À l'aide de modélisations multicristallines par éléments finis prenant en compte la microstructure des revêtements, on explique en particulier comment la présence du substrat implique l'activation de nombreux modes de déformation. L'effet de la multiaxialité du chargement est également étudié.

L'endommagement a été identifié. Parmi les nombreux mécanismes observés, on ne retient que celui qui met localement le substrat à nu: le clivage des grains de zinc. Après avoir étudié les interactions possibles entre les fissures de clivage et les macles apparues, on procède à une analyse quantitative de l'endommagement. L'influence de la microstructure sur la résistance à l'endommagement est alors démontrée. Un modèle d'endommagement est discuté. On souligne son intérêt lorsqu'il est couplé aux

modélisations multicristallines, grace aux perspectives offertes notamment en terme de description des interactions avec le maillage.

Hot-dip galvanized steel sheets are largely used, for instance in the automotive industry. During forming processes of these sheets, zinc coating is plastically deformed and eventually damaged. The aim of this work is to contribute to the understanding of the deformation and damage micromechanisms of zinc when the steel substrate is plastically deformed.

Studied galvanized sheets are made of very flat zinc grains, with only one grain through the thickness, on a comparatively small-grained ferritic steel. Three coatings have been studied: only their microstructures are different. The first one has some pancake-like grains with a grain size in the sheet plane of about  $600\mu\text{m}$  for a thickness of only  $10\mu\text{m}$ . The second coating is identical to the first one but with many twins introduced by the rolling temper. The third coating, which remains monocristalline through the thickness, has a small grain size of only  $40\mu\text{m}$  in the sheet plane. The last coating has been carried out performing a recrystallisation heat-treatment after the rolling temper. A chemically identical bulk polycristalline zinc material has been also studied.

Deformation modes have been systematically studied for these three microstructures, after tensile tests, plane stress tests and equibiaxial expansion tests. This analysis combines EBSD (Electron Back-Scattered Diffraction) and classical observation tools. Results are compared with those obtained on the chemically identical bulk zinc material. While bulk zinc exhibits a classical mechanical behavior, with basal slip essentially, coatings activate many deformation modes, preferentially pyramidal  $\pi_2$  slip and twinning.

This unusual result is shown to be due to a substrate effect; basal texture is an insufficient explanation. Using finite element calculations with a multicristalline description, the substrate is shown to imply activation of numerous deformation modes on the studied zinc coatings. The multiaxiality of the loading is studied as well.

Damage modes have been identified: attention was focused on cleavage. After studying the interactions between cleavage cracks and twins, a quantitative analysis of damage is achieved. The influence of the coating microstructure is clearly pointed out. A damage criterion for cleavage initiation is then discussed. Its interest is underlined when it is coupled with multicristalline modellings, particularly for describing interactions between cleavage cracks and mechanical twins.





COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES MOUSSES  
D'ALUMINIUM : CARACTERISATIONS  
EXPERIMENTALES SOUS SOLLICITATIONS  
COMPLEXES ET SIMULATIONS NUMERIQUES  
DANS LE CADRE DE LA L'ELASTO-PLASTICITE  
COMPRESSIBLE

Jean-Sébastien BLAZY

Directeurs de thèse : Y. Chastel, S. Forest  
soutenue le 25 avril 2003

jury : Y. Bréchet (rapporteur), H. Zhao (rapporteur), M.  
Langseth, E. Maire, F. Moussy, A. Awadé, A. Pineau.

Les impératifs croissants en terme de sécurité passive, mais également en terme de consommation et d'émissions polluantes, imposent aux constructeurs automobiles de trouver de nouvelles voies pour rendre leurs véhicules plus sobres et plus sûrs. Une solution structure à ce problème peut être envisagée : accroître la présence d'aluminium dans les véhicules. Mais l'aluminium peut également, par des techniques adaptées, être moussé. Il constitue alors un matériau cellulaire aux propriétés spécifiques très intéressantes notamment en terme de dissipation d'énergie lors d'impacts. En combinaison avec d'autres structures, comme des profilés par exemple, la mousse d'aluminium peut former des composites rigides et légers qui constituent une solution nouvelle pour la conception d'absorbeurs de chocs. Cependant, le coût de revient des mousses d'aluminium, la difficulté à contrôler son processus de fabrication, les méthodes d'intégration, encore peu définies et validées, ainsi que l'absence d'outil informatique d'aide à la conception de structures comprenant ces mousses, sont autant d'obstacles à leur utilisation effective dans les véhicules de grandes séries. Ces dernières années, les mousses d'aluminium ont donc suscité un intérêt considérable à la fois auprès de la communauté scientifique mais également auprès des industriels toujours à la recherche de solutions en rupture. Ainsi elles ont été très souvent étudiées du point de vue de leur microstructure et de leur comportement en compression. Les études sous chargements multi-axiaux sont plus rares. Pourtant la compréhension du comportement sous chargement multiaxial de ce matériau reste indispensable dans le but d'obtenir un dimensionnement optimisé de structures comprenant ces mousses. Afin d'être fiable, ce dimensionnement doit également tenir compte de la grande variabilité du comportement des mousses due à la présence de fortes hétérogénéités microstructurales, mesostructurales voire, dans certains cas, macrostructurales. L'objectif de cette thèse est de comprendre ces deux aspects et de proposer des modèles aussi simples que possible afin de réaliser un dimensionnement fiable et optimisé. Ainsi, la compression, la traction, le cisaillement, la torsion et des chargements proportionnels ou non proportionnels de traction - compression / torsion ont été étudiés. Pour chaque type de chargement la dispersion a été caractérisée. Si une distribution de Weibull permet de décrire la dispersion en traction, l'utilisation d'une contrainte équivalente couplée à une statistique de Weibull permet de prédire la dispersion pour d'autres types de chargements. L'observation des essais de compression grâce à l'utilisation de méthodes de mesure de champs par corrélation d'images ou de tomographie à rayon X indique sans ambiguïté que la déformation de la mousse d'aluminium s'effectue avec une forte localisation sous forme de bandes. La prise en compte de

la localisation de la déformation dans la modélisation du comportement est réalisée en utilisant la méthode des éléments finis dans le cadre de la plasticité des matériaux compressibles. L'erreur commise lorsque ces phénomènes de localisation sont ignorés est quantifiée. Un plus grand réalisme peut être atteint encore en considérant l'hétérogénéité initiale de la mousse dans la simulation. Enfin une tentative de prise en compte de la connaissance tri-dimensionnelle réelle de la structure de la mousse par tomographie dans la modélisation continue est présentée.

An extensive experimental program and detailed mechanical analysis were performed to test and model the statistical response of metallic foams under complex loading conditions. Tensile tests were performed on more than eighty specimens of closed-cell aluminium foams with four different specimen sizes. These test results show a large scatter and a significant size effect especially on standard deviation. The average fracture stress and, more significantly, the corresponding scatter decrease for increasing volume sizes. A Weibull statistical analysis is performed and gives a Weibull modulus close to 8. Compression tests were also carried out. Both mean fracture stress in tension and mean peak stress in compression and the corresponding dispersions are correctly described by a single set of Weibull parameters. The statistical model is extended to multi-axial loading conditions by introducing an effective stress measure involving both the deviatoric part of the stress tensor and its trace. One additional parameter is identified using the average shear yield stress obtained from pure shear tests and torsion tests on solid bars. The model is then able to predict the dispersion found for the shear strength. Two types of combined tension/compression-torsion loading conditions were then tested experimentally. The non-proportional loading path consists of a tension test followed by torsion, keeping the axial stress constant. In the proportional loading path, shear and axial stress follow a straight line in the stress space. The corresponding surface of average yield/fracture stress is found to be symmetric. The experimental results are in good agreement with the predictions of the statistical model. The model predicts a bell-shaped surface for the first loading path and a quasi-elliptic one for the proportional one. The scatter found in the description of this surface is also accounted for accurately by the model. A brief discussion of an extension of Beremin's micromechanical model to the statistical failure of brittle foams is presented.

Aluminium foams cannot deform homogeneously under compression or multiaxial loading. Strain localization bands form in compression, that are approximately normal to the load axis. The plateau observed on the overall load displacement curve is due to the formation and propagation of such bands. Densification starts when all cell rows are crushed. These strain localisation phenomena must be taken into account for the identification of a constitutive model. This requires structural computations of the compressed sample. For that purpose, the softening behaviour observed after the initial peak stress on all compression curves is explicitly incorporated into the constitutive modelling. The proposed continuum compressible plasticity was implemented into a finite element program to simulate the band formation and propagation. The initial softening effect triggers strain localization in narrow bands. The densification taking place inside the band after a critical strain is responsible for the formation of new bands near or far from the first one. A good agreement is obtained with experimental results when the heterogeneous density field, deduced from tomographical analyses, is included in the simulation. In particular this heterogeneity induces a slight hardening instead of the theoretical plateau as observed experimentally.



## NOTION OF REPRESENTATIVE VOLUME ELEMENT FOR HETEROGENEOUS MATERIALS : STATISTICAL AND NUMERICAL APPROACH

Toufik KANIT

Directeurs de thèse : S. Forest, D. Jeulin  
soutenue le 12 mai 2003

jury : P. Pilvin (rapporteur), K. Sab (rapporteur), M. Ostoja-Starzewski, S. Singleton, M. Reed, V. Mounoury

The Representative Volume Element (RVE) plays a central role in the mechanics and physics of random heterogeneous materials with a view to predicting their effective properties. A quantitative definition of its size is proposed in this work using a numerical and statistical approach. A RVE size can be associated with a given precision of the estimation of the wanted overall property and the number of realizations of a given volume  $V$  of microstructure that one is able to consider. It is shown to depend on the investigated morphological or physical property, the contrast in the properties of the constituents, and their volume fractions. The methodology is developed on a specific random microstructure, namely a two-phase three-dimensional Voronoi mosaic and applied to a real two-phase heterogeneous material from food industry. Large scale finite element simulations of volumes of different sizes are performed in the case of linear elasticity (thermal conductivity respectively), using parallel computing. The volumes are subjected to homogeneous strain (gradient of temperature respectively), stress (heat flux respectively) at the boundary or periodic boundary conditions. The effective properties can be determined for large volumes and a small number of realizations. Conversely, smaller volumes can be used providing that a sufficient number of realizations is considered. A bias in the estimation of the effective properties is observed for too small volumes for all types of boundary conditions. The variance of computed apparent properties for each volume size is used to define the precision of the estimation. The key-notion of integral range is introduced to relate this error estimation and the definition of the RVE size. For given precision and number of realizations, one is able to provide a minimal volume size for the computation of effective properties. The results can also be used to predict the minimal number of realizations that must be considered for a given volume size in order to estimate the effective property for a given precision. The RVE sizes found for elastic and thermal properties, but also for a geometrical property like volume fraction, are compared. A general comparison of the elastic and thermal properties of three different microstructures is given for Voronoi mosaics, two real material from food industry and another virtual model, a boolean model of hexagonal prismatic rods and plates. Computational homogenization technique is used to predict the effective properties from 3D confocal images of real samples. An analysis of the percolation strain fields in deformed samples is proposed to select stiffer or higher conductive products. The present work can be regarded as a first step towards a computational approach of the design of microstructures for wanted overall properties. The aim is to explore new morphologies that can lead to unexpected properties like outstanding stiffness or conductivity, or controlled compliance.



CARACTERISATIONS MICROSTRUCTURALE  
ET MECANIQUE DE MOUSSES DE NICKEL A  
CELLULES OUVERTES POUR BATTERIES DE  
VEHICULES HYBRIDES

Virginie GOUSSERY-VAFIADES

Directeurs de thèse : Y. Bienvenu, S. Forest  
soutenue le 2 mars 2004

jury : F. Delannay (rapporteur), R. Le Gall (rapporteur), L.  
Salvo, M. Croset, C. Colin.

Les mousses de nickel sont utilisées comme support d'électrode de batteries Ni-MH (Nickel/Métal Hydrure) pour les véhicules hybrides. Le procédé de fabrication consiste à déposer environ 10 microns de nickel sur une mousse de polyuréthane à cellules ouvertes. Un traitement thermique est ensuite appliqué avec un double objectif : élimination du polymère sous air lors d'un cycle thermique jusqu'à 600°C, suivi d'un recuit à 1000°C sous atmosphère réductrice pour atteindre les propriétés mécaniques requises au cahier des charges.

Le principal objectif de cette étude est la réduction des coûts de production tout en améliorant les caractéristiques mécaniques de la mousse. Une des actions de progrès consiste à optimiser le traitement thermique. Pour ce faire, dans une première partie, une optimisation de la dégradation thermique du polyuréthane est étudiée par analyse thermogravimétrique. La dégradation sous air conduit à la superposition de trois phénomènes dont les énergies d'activation associées ont été calculées par la méthode de Kissinger. Après déconvolution des courbes ATG afin de dégager la contribution de chacun des phénomènes, un modèle de dégradation thermique est proposé.

Dans une seconde partie, l'influence de la taille de grains sur les propriétés mécaniques de la mousse a été étudiée. Les caractérisations métallurgiques ont permis une analyse du grossissement des grains qui s'opère durant le recuit. La technique EBSD a permis de savoir si les brins de nickel conservent la texture inhérente à celle du dépôt électrolytique et si la structure cristalline du nickel recuit est isotrope. De plus, cette technique s'est révélée fort pratique pour distinguer les grains des macles de recuit. L'influence de la taille des grains sur les propriétés mécaniques a été étudiée via la loi de Hall-Petch. Les parois des brins de nickel étant très fines, de l'ordre de 10 microns, la croissance des grains et le comportement mécanique peuvent être différents par rapport à du nickel massif. Les résultats obtenus pour les mousses de nickel ont donc été comparés, d'une part avec ceux recensés dans la littérature pour le nickel pur et dense, et d'autre part avec des feuillards de nickel de 10 et 50 microns d'épaisseur. La loi de Hall-Petch est observée pour des tailles de grains inférieures à l'épaisseur des feuillards ou à la paroi des brins dans le cas des mousses, tandis que lorsque la microstructure devient "bambou", la limite d'élasticité reste constante. Finalement, un modèle mécanique, dans l'esprit de celui de Gibson and Ashby, est présenté en incorporant l'effet de la taille des grains sur la limite d'élasticité et le module plastique.

Les piles à combustible constituent un autre marché potentiel pour les mousses de nickel, demandant de hautes températures de fonctionnement. Pour connaître le comportement de la mousse à haute température,

des essais de fluage en traction ont été réalisés, d'une part entre 100 et 200°C sous air et d'autre part, entre 500 et 700°C sous vide primaire. Les paramètres de fluage, à savoir, l'exposant de Norton et l'énergie d'activation ont été déterminés expérimentalement et incorporés dans deux modèles mécaniques reposant sur la déformation des brins par flexion ou par traction.

Among other applications, nickel foams are used as an electrode element in Ni-MH (Nickel/Metal Hydride) batteries for hybrid vehicles. The nickel foam production at NiTECH starts with a 10 microns thick coating of nickel onto an open-cell polyurethane foam. Afterwards, a heat treatment is made with a twofold objective : the polyurethane foam is removed from the structure by a non-isothermal combustion under air up to 600°C, then an anneal at roughly 1000°C under a reducing atmosphere is designed so that the nickel foam meets the targets for elongation and strength to fracture. The major aim of this study is to reduce the costs of production and at the same time to improve mechanical properties of nickel foams. One of the possible ways is an optimization of the thermal treatment.

For that purpose, in a first part, the thermal degradation of the polyurethane foam was studied by thermogravimetric analysis. The degradation under air involves three superimposed phenomena. The corresponding activation energies were calculated by the Kissinger method. Afterwards, the three phenomena were separated to isolate the contribution of each of them, and the thermal degradation was modeled.

In a second part, the dependence of the mechanical behavior of nickel foams upon grain size was studied. Thanks to metallurgical characterizations, the grain coarsening phenomenon which occurs during the anneal of foams was analyzed. The EBSD technique allowed to observe whether the nickel strut grains keep the texture inherent to the electrolytic deposition step and also, to check the isotropy of the recrystallized nickel. Furthermore, this technique made the measurements easier by eliminating the annealing twins from the grain distributions. The grain size effects on the mechanical properties was then studied, namely via the Hall-Petch law. The foam walls being very thin, roughly 10 microns in thickness, grain growth and mechanical behavior might be different from that of bulk nickel. The results obtained with foams were compared, on the one hand, with literature data on bulk pure nickel, and on the other hand with nickel foils of 10 and 50 microns in thickness. The Hall-Petch law is observed when the grain size is lower than the foil thickness or the wall thickness in the case of foams, whereas once the microstructure becomes "bamboo", the yield strength remains constant. Finally, a mechanical model in the spirit of this by Gibson and Ashby was presented incorporating the grain size effect on yield strength and hardening modulus.

Besides, an other application of nickel foam could be found in the fuel cells operating at high temperatures. In order to investigate the behavior of nickel foams at high temperatures, tensile creep tests were carried out, on the one hand between 100 and 200°C under air, and on the other hand, in the range from 500 to 700°C under a primary vacuum. The creep parameters, i.e. the Norton exponent and the activation energy were estimated experimentally and incorporated in two mechanical models considering creep bending or creep traction of the struts.



CARACTERISATION ET SIMULATION NUMÉRIQUE  
DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES MOUSSES  
DE NICKEL : MORPHOLOGIE TRIDIMENSION-  
NELLE, REPOSE ELASTOPLASTIQUE ET RUPTURE

Thierry DILLARD

Directeurs de thèse : S. Forest, Y. Bienvenu

soutenue le 4 mars 2004

jury : A. Mortensen (rapporteur), E. Maire (rapporteur), J.  
Crépin, R. Dendievel, M. Croset.

L'objectif de ces travaux de thèse est double. Il consiste, dans un premier temps, à étudier la microstructure des mousses de nickel ainsi que les mécanismes locaux de déformation et de rupture, puis, dans un second temps, à proposer une modélisation du comportement mécanique global en traction des mousses.

Des essais mécaniques in-situ sous MEB ou en tomographie aux rayons X ont été réalisés. Ces essais montrent que les mécanismes de déformation en traction diffèrent de ceux observés en compression. La mousse se déforme en traction par réalignement et étirement des brins tandis qu'une flexion suivie d'un flambement des brins s'opèrent en compression. De plus, une forte localisation de la déformation dans les zones moins denses de la mousse est visualisée au cours d'un essai de compression. L'étude des mécanismes de rupture en traction fait aussi apparaître que la fissuration des mousses, majoritairement transgranulaire, intervient préférentiellement aux noeuds. Sa propagation s'effectue cellule par cellule et la zone endommagée possède une largeur d'environ cinq cellules. A partir des essais de tomographie aux rayons X, l'architecture initiale de la mousse ainsi que son évolution au cours du chargement ont été reconstruites. L'analyse de la morphologie tridimensionnelle de la mousse montre qu'un tiers des cellules est constitué de dodécaèdres et que 57 fabrication de la mousse est de deuxième importance par rapport à celui de la mousse précurseur en polyuréthane. Les cellules sont allongées et orientées suivant la direction normale de la mousse. Cette anisotropie géométrique explique, au moyen d'un modèle analytique simple, l'anisotropie élastique observée en traction. La forme de la cellule la plus répandue a aussi été identifiée. Il s'agit d'un dodécaèdre, composé de deux quadrilatères, de huit pentagones et de deux hexagones.

Pour modéliser le comportement mécanique des mousses en traction, deux voies ont été envisagées. La première consiste à décrire la mousse par un réseau de poutres se déformant uniquement par flexion. Le comportement uniaxial des mousses est alors simulé en fonction de la densité et de l'anisotropie géométrique. Le modèle montre que l'arrivée et la propagation du front plastique dans la poutre ne suffisent pas à expliquer la non linéarité du comportement macroscopique observée expérimentalement. A partir des lois de comportement des matériaux constitutifs des brins de la mousse, le modèle est aussi capable de prévoir le comportement uniaxial global de mousses multiphasées. L'application du modèle à deux phases au cas des mousses de nickel oxydées prouve que le comportement plus rigide des mousses oxydées peut être prédit en fonction de leur degré d'oxydation en tenant compte, toutefois, de la rupture de la couche d'oxyde. La deuxième approche, plus phénoménologique, met en oeuvre une vision continue

de la mousse. La mousse est alors assimilée à un milieu homogène équivalent. Des essais mécaniques, mesurant simultanément les déformations instantanées dans les trois directions principales de la mousse, ont été développés pour identifier les paramètres du modèle. Le modèle multiaxial est alors testé autour d'un trou macroscopique réalisé dans une plaque de mousse, puis validé par comparaison avec les champs de déformation issus d'essais photomécaniques. Ces essais photomécaniques mettent en évidence des hétérogénéités de déformation non expliquées ainsi qu'un effet d'échelle dû à la taille critique d'un trou dans un milieu poreux. Le modèle classique, inapte à prévoir cet effet de taille, est alors étendu vers la mécanique des milieux continus généralisés. En introduisant une seule longueur interne supplémentaire, le modèle micromorphe choisi est capable de rendre compte de l'effet d'échelle observé expérimentalement. De plus, ce modèle permet aussi de donner une bonne estimation de la largeur de la zone fissurée et de la ductilité des mousses en présence de fissures.

### Mechanical behaviour of nickel foams : 3D morphology, non-linear models and fracture

The deformation behaviour and failure of nickel foams were studied during loading by using X-ray microtomography. Strut alignment and stretching are observed in tension whereas strut bending followed by strut buckling are observed in compression. Strain localisation, that occurs during compression tests, depends on nickel weight distribution in the foam. Fracture in tension takes place at cell nodes and crack propagated cell by cell. The damaged area is about five cells wide. A detailed description of the 3D morphology is also presented. One third of the cells are dodecahedra and 57% of the faces are pentagonal. The most frequent cell is composed of two quadrilaterals, two hexagons and eight pentagons. The dimensions of the equivalent ellipsoid of each cell are identified and cell orientation are determined. The geometrical aspect ratio is linked to the mechanical anisotropy of the foam.

In tension, an uniaxial analytical model, based on elastoplastic strut bending, is developed. The whole stress-strain curve of the foam is predicted according to its specific weight and its anisotropy. It is found that the non-linear regime of the macroscopic curve of the foam is not only due to the elastoplastic bending of the struts. The model is also extended to two-phases foams and the influence of the hollow struts is analysed. The two-phases foams model is finally applied to oxidized nickel foams and compared with experimental data. The strongly increase of the rigidity of nickel foams, according to the level of oxidation, is well-described by the model. However, a fracture criterion must also be introduced to take into account oxide layer cracking.

A phenomenological compressible continuum plasticity model is also proposed and identified in tension. The identification of the model is carried out using experimental strain maps obtained by a photomechanical technique. A validation of the model is provided by investigating the strain field around a hole in a foam. The multiaxial model is extended to a micromorphic one to incorporate non local features accounting for the size effects observed for small holes. The prediction of the model is evaluated in the case of subsequent fracture of the specimen through crack propagation.