

GDR CNRS 3180 MECANO
« Mécanique des Nano-Objets »
Rapport d'activité 2008-2010

INP, Section 05
INP, Section 06
INC, Section 15
INSIS, Sections 08 et 09
Physique, Mécanique & Chimie

Sommaire

1. Objectifs scientifiques	3
2. Fonctionnement	6
3. Laboratoires participant	7
4. Activités 2008-2010 et projets 2011	9
5. Bilan financier	11
6. Bilan et Perspectives	12
 <u>Annexes</u> <hr/>	
Synthèse Atelier « Elasticité de surface »	19
Synthèse Atelier « Microdiffraction en faisceau blanc : des mesures vers une analyse physique »	25
Rapport Ecole « Mécanique des Nano-objets »	29
Publications et thèses	46

1. OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

Le GDR MECANO a été créé en 2008 pour animer une approche pluridisciplinaire (physique, mécanique, chimie) sur la mécanique aux échelles nanométriques.

L'étude de l'influence de la réduction de taille sur les propriétés physiques constitue un des grands objectifs des nanosciences. En particulier l'évaluation des propriétés mécaniques des nano-objets est un sujet d'étude en pleine expansion qui pose des questions à la fois théoriques et expérimentales : Comment décrire l'élasticité aux échelles nanométriques ? Quelle est l'influence des défauts résiduels, des surfaces... sur la plasticité de ces objets ? Comment tester les propriétés mécaniques de nano-objets ? Comment mesurer des champs de déformations aux échelles nanométriques ? ... Au-delà de l'intérêt fondamental à comprendre et décrire ces propriétés mécaniques aux échelles ultimes, la maîtrise de ces propriétés est également un enjeu important pour la conception, la fabrication et la fiabilité de nano-dispositifs innovants (« strain engineering » pour l'optimisation de la mobilité des porteurs ou des structures de bandes, contrôle de l'anisotropie magnétique, auto-organisation, NEMS,...).

La compréhension des propriétés mécaniques des matériaux aux petites dimensions nécessite de développer une approche pluridisciplinaire regroupant des physiciens, des mécaniciens et des chimistes. Le GDR MECANO est structuré autour de trois axes: Le premier axe concerne l'étude des propriétés mécaniques aux petites dimensions. Il s'appuie naturellement sur les axes II et III respectivement consacrés aux méthodes d'analyse (axe II) et à la synthèse d'objets modèles ainsi qu'à la physique de la croissance sous contraintes (axe III). L'enjeu de l'axe I est de faire progresser la connaissance de la compréhension des propriétés mécaniques aux petites échelles. Le deuxième axe concerne le développement de méthodes d'analyses expérimentales et théoriques dévolues à l'étude des contraintes et déformations locales, ce qui représente un véritable enjeu tant du point de vue fondamental que du point de vue des applications. Le troisième axe concerne d'une part la fabrication d'objets modèles qui pourront être étudiés par diverses méthodes complémentaires et d'autre part l'étude des mécanismes de fabrication/croissance de matériaux contraints (l'un des enjeux consiste à contrôler la croissance ou l'auto-organisation via des contraintes élastiques).

I/ Propriétés mécaniques des objets de petite taille

Comme c'est le cas pour d'autres propriétés physiques, les propriétés mécaniques sont fortement influencées par la taille des objets. Il est d'ailleurs bien établi que la plasticité des métaux est contrôlée par des longueurs caractéristiques (distance entre précipités, entre dislocations, taille de grains, ...). Un exemple parmi d'autres est la célèbre loi de Hall et Petch qui stipule que la limite élastique d'un polycristal est inversement proportionnelle à la racine carrée de la taille des grains. Aux échelles macro et mésoscopiques les lois de comportement sont raisonnablement bien comprises et décrites à partir du comportement collectif des défauts (dislocations par exemple).

L'étude de la plasticité des films minces et petits objets a été et est encore l'objet d'une recherche active. L'influence de l'épaisseur du film sur la limite élastique a clairement été mise en évidence dans de nombreuses études. Un durcissement du type Orowan (limite élastique proportionnelle à $1/d$ où d est la dimension caractéristique du problème, par exemple l'épaisseur du film) est observé mais de nombreuses questions restent encore ouvertes : comment rendre compte quantitativement du durcissement des films polycristallins ? Quelle est l'influence du fluage diffusif dans les films les plus minces ? Comment décrire la plasticité des matériaux les plus minces (typiquement en dessous de 100 nm) lorsque la contrainte d'écoulement est contrôlée par la nucléation des dislocations plutôt que par leur mobilité ? ... Les études les plus récentes insistent particulièrement sur l'influence particulière du nombre limité de défauts

responsables de la déformation lorsque la taille diminue : l'influence des surfaces ou bien des joints de grains devient prépondérante sur l'annihilation et la nucléation des défauts.

Au-delà de la déformation plastique et du fluage diffusionnel d'autres aspects sont également à prendre en compte :

- l'influence des contraintes de surface (interface / surface libre) sur le comportement mécanique des polycristaux nanostructurés et des nanocristaux
- la modification de l'élasticité pour des tailles inférieures à typiquement 3 nm
- La mécanique de la rupture aux petites échelles (clivage et surtout propagation de fissure par fatigue thermomécanique)
- Les hétérogénéités intra- et inter-granulaires de contraintes et de déformation dans les polycristaux à taille de grain nanométrique

La mécanique discrète couplant les défauts linéiques et surfaciques explicites à l'élasticité isotrope ou anisotrope, ainsi qu'à la diffusion (transport de matière) doit permettre d'aborder ces différentes questions. La modélisation continue de la plasticité cristalline quant à elle représente une modélisation simplifiée de ces phénomènes. Aujourd'hui capable de rendre compte des formidables hétérogénéités de contrainte et de déformation dans les agrégats polycristallins volumiques ou en couches minces, la modélisation continue de la plasticité cristalline basée sur l'écriture de lois de comportements à variables internes, ainsi que ses extensions aux milieux continus généralisés (théorie à gradients d'ordre supérieur par exemple) permet de décrire, au moins qualitativement, des effets d'échelles tels que l'effet Hall-Petch, le durcissement par précipitation, le comportement des couches minces... L'enjeu est aujourd'hui d'enrichir ces modèles par une représentation plus réaliste du comportement des joints de grains et la question du nombre limité de dislocations présentes.

II) Développement de méthodes d'analyse des déformations.

Aborder les questions précédentes passe nécessairement par une double approche expérimentale et théorique.

L'approche expérimentale devra s'appuyer sur des essais mécaniques contrôlés réalisés sur des petits objets ou des collections d'objets. Aux échelles sub-microniques visées les analyses in situ (dans un microscope électronique en transmission ou bien en utilisant le rayonnement synchrotron) sont essentielles.

La simulation numérique aux échelles adaptées est aujourd'hui un outil indispensable pour appréhender les mécanismes responsables de la déformation plastique aux petites échelles. On peut noter que la taille des boîtes de simulation atomique se rapproche de la taille des objets étudiés expérimentalement ce qui rend la simulation encore plus pertinente.

Les outils décrits ci-dessous seront au service de l'étude des propriétés mécaniques des objets de petite taille.

- *Analyse locale des déformations* : Il y a aujourd'hui – en particulier à cause des besoins de la microélectronique – une activité très importante pour développer des méthodes d'analyse aussi locales que possibles : Microscopie électronique (CBED, HREM...), diffraction des rayons X (micro-diffraction, diffraction cohérente), micro et nano-spectroscopie Raman (UV, champ proche). En particulier la communauté qui se constitue autour de la microdiffraction et du rayonnement synchrotron participe activement à ce GDR.
- *Micro et nano tests mécaniques* : Ceux-ci seront rendus possibles par le développement d'objets spécifiques (nanopoutres, nanopiliers...) et d'outils permettant de réaliser des essais mécaniques in situ à cette échelle et sur des objets individuels (par exemple nanoindentation, essais de flexion sur

micropoutres, porte-objet MET pour la nanoindentation in situ, ...). Objets d'étude et outils de mesure peuvent également être réunis dans un même dispositif du type MEMS.

- *La simulation numérique à différentes échelles* (ab-initio, dynamique moléculaire, Dynamique des Dislocations, Calculs multi / poly-cristallins) est un point clef pour la compréhension des propriétés mécaniques aux petites échelles, notamment pour évaluer des écarts à l'élasticité macroscopique ou des effets de contrainte d'interface ainsi que la relaxation des contraintes en surface. Elle est aussi nécessaire bien souvent pour interpréter les mesures locales.

III) Micro et nanofabrication d'objets modèles « simples »

L'étude des propriétés mécaniques aux petites échelles passe bien évidemment par la réalisation d'objets modèles. Il est important de souligner que les contraintes mécaniques peuvent jouer un grand rôle dans les phénomènes de nanostructuration. C'est une des originalités de ce GDR que de faire maintenant travailler ensemble mécaniciens et physiciens de la croissance sur la croissance sous contraintes.

Les nano-objets sont dans la mesure du possible étudiés par plusieurs des techniques complémentaires décrites ci-dessus. Ces objets peuvent être obtenus par deux types d'approche :

- *La micro et nano-fabrication* par FIB, lithographie, ... d'objets tels que des micro-piliers ou des micro-poutres bien adaptés à la réalisation de micro et nano tests mécaniques ; ces objets peuvent être étudiés individuellement.
- La réalisation d'assemblées d'objets de taille nanométrique utilisant des mécanismes de croissance sous contrainte. Il peut s'agir des contraintes d'épitaxie (hétéro épitaxie à fort désaccord paramétrique et effet des contraintes d'interface), de contraintes induites par des réseaux de dislocation enterrés ou par des réseaux de marches en surface (surfaces vicinales).

La croissance organisée sous contrainte est une manière de réaliser des nano-objets mais c'est aussi un sujet scientifique à part entière : Quelles sont les limites de l'auto-organisation par les contraintes ? Quel est l'impact des contraintes de surface sur les mécanismes de croissance, sur l'autoorganisation ? D'autre part les contraintes que peuvent supporter les objets de petite taille peuvent être très élevées (quelques GPa par exemple dans les contraintes d'épitaxie). Dans quelle mesure la mécanique des milieux continus est-elle transposable à ces objets ? Quelle est l'influence de telles contraintes sur la thermodynamique (modification du diagramme des phases) et sur la cinétique (modification des coefficients de diffusion, influence des gradients de concentration) ? Il apparaît aussi important d'étudier les propriétés de démouillage ou de décohésion (facettage de fils sous contraintes d'électromigration, délamination de films minces sous contraintes élastiques, démouillage de couches minces sous contraintes élastiques ou thermiques...). Ces effets sont susceptibles de jouer un grand rôle lors des différentes étapes de la réalisation industrielle de structures complexes, ainsi qu'au cours de leur fonctionnement, puisque ces effets peuvent dégrader les dispositifs voire entraîner leur destruction.

2. MODE DE FONCTIONNEMENT

2.1. DIRECTION

Directeur : O. Thomas (IM2NP)

Directeurs adjoints : A. Ponchet (CEMES)

S. Forest (Mines ParisTech)

2.2. Bureau

Le bureau organise la vie scientifique du GDR. Il définit les thématiques des réunions et propose des intervenants à inviter. Il est composé de :

Olivier Castelnau, PIMM, Paris
Benoit Devindre, LEM ONERA, Chatillon
Stéphanie Escoubas, IM2NP, Marseille
Samuel Forest, Mines ParisTech, Paris
Patrice Gergaud, CEA/LETI, Grenoble
Philippe Goudeau, Pprime, Poitiers
Christine Goyhenex, IPCMS, Strasbourg
Geneviève Grenet, INL, Lyon
Stéphane Labat, IM2NP, Marseille
Marc Legros, CEMES, Toulouse
Christine Mottet, CINaM, Marseille
Pierre Müller, CINaM, Marseille
Laurent Pizzagalli, Pprime, Poitiers
Anne Ponchet, CEMES, Toulouse
Odile Robach, CEA-INAC, Grenoble
Olivier Thomas, IM2NP, Marseille

Le bureau se réunit environ deux fois par an, soit à l'école des Mines à Paris soit à l'occasion des réunions plénières du GDR.

2.3. Circulation de l'information

Courrier électronique : mecano@im2np.fr

Deux types d'informations sont communiqués par courrier électronique à l'ensemble de la liste de diffusion :

- Les informations propres au GDR telles que les annonces de réunions.
- Des annonces d'intérêt général pour la communauté: formation permanente, congrès, et un grand nombre de propositions de postes permanents ou non (post-doc, thèses...).

Ce mode d'échange s'est avéré très efficace et satisfaisant pour le plus grand nombre. La liste de diffusion est évolutive et intègre régulièrement de nouvelles personnes qui en font la demande.

Site WEB : <http://www.im2np.fr/GDR-Mecano>

Ce site regroupe les informations du GdR et met à la disposition de tous le contenu de bon nombre des communications présentées dans les diverses manifestations organisées par le GdR.

2.4. Le budget

Les dotations annuelles du GDR accordées par le CNRS ont été de 10000€ pour la période 2008-2010. Elles ont été utilisées pour financer les colloques annuels, les séminaires thématiques, les réunions du bureau.

3. LABORATOIRES PARTICIPANT

ArcelorMittal Research

CEA DEN\DEC\SESC\LLCC, Cadarache

Centre des Matériaux, Mines Paris Tech

CEMES CNRS, Toulouse

CMPGC Mines St Etienne, Gardanne

CINAM CNRS, Marseille

DRFMC/SP2M/NRS CEA, Grenoble

FEMTO-ST CNRS-Univ. Besançon, Besançon

IEF CNRS-Univ. Paris XI, Orsay

IEMN CNRS-Univ. Lille 1, Villeneuve d'Asq

Institut Jean Lamour CNRS Nancy

IMN CNRS -Univ. Nantes, Nantes

INAC CEA-Grenoble

INL CNRS-Centrale Lyon, Ecully

INSP CNRS-Univ. P. et Marie Curie, Paris

Instit. Néel CNRS, Grenoble

IPCMS CNRS-Univ. Louis Pasteur, Strasbourg

Institut des Systèmes Intelligents et Robotique (ISIR)

IM2NP CNRS-Aix-Marseille Universités, Marseille

LEM CNRS-ONERA, Chatillon
LEMMMA Université La Rochelle
LETI CEA, Grenoble
LMS CNRS-Ecole Polytechnique, Palaiseau
LPM CNRS-Univ. Henri Poincaré, Vandœuvre
LPMCN CNRS-Univ. Lyon 1, Villeurbanne
LPMIA CNRS-Univ. Henri Poincaré, Vandœuvre
LPMM - Arts et Métiers ParisTech
LPMTM CNRS-Univ. Paris XIII, Villetaneuse
LPN CNRS, Marcoussis
LPSE CNRS-Univ. Haute Alsace, Mulhouse
LSGS CNRS-INPL, Nancy
MMPF Univ. Haute Alsace, Mulhouse
MPQ CNRS-Univ. Paris VII, Paris
MSSMAT CNRS-Centrale Paris, Chatenay Malabry
PECM CNRS-Mines St Etienne, St Etienne
PIMM, CNRS – Arts & Métiers ParisTech, Paris
PPRIME CNRS - Poitiers
SIMaP CNRS-INPG, St Martin d'Herès
SPCSI CEA, Saclay
St Gobain Recherche, Aubervilliers
STMicroelectronics, Crolles
STMicroelectronics, Rousset
SVI CNRS-St Gobain, Aubervilliers
Synchrotron SOLEIL, St Aubin

4. REUNIONS ORGANISEES PAR LE GDR MECANO 2008-2011.

Les comptes rendus des ateliers thématiques ainsi que le bilan de l'école MECANO 2010 sont joints en annexe. Ils sont également accessibles sur le site web (<http://www.im2np.fr/GDR-Mecano>) sur lequel on peut trouver les fichiers des présentations.

4.1. Réunions plénières

1. **Colloque 13 -14 mars 2008 à Marseille (IM2NP)**. Organisateur S. Escoubas, S. Labat, C. Paitel et O. Thomas, 64 participants
2. **Colloque 23-24 avril 2009 à Paris (Ecole des Mines)**. Organisateur Henry Proudhon et Samuel Forest, 38 participants
3. **Colloque 7-8 avril 2011 à Poitiers (PPRIME)**. Organisateur Laurent Pizzagalli

Il n'y a pas eu de réunion plénière en 2010, car cette année a été dédiée à l'école thématique « Mécanique des Nano-objets », qui a eu lieu en mars 2010 (87 participants).

4.2. Ateliers thématiques

Ces réunions ont pour but d'apporter un éclairage spécifique sur des questions posées de façon parfois informelle et intéressant le GDR. Elles se déroulaient typiquement sur deux demi-journées (un après-midi, une matinée et éventuellement un début d'après-midi) pour limiter à deux jours pleins la durée du déplacement. Le programme des ateliers est toujours conçu de façon à laisser autant de temps à la discussion qu'aux présentations.

Outre la définition du thème scientifique, le GDR contribue activement à ces ateliers par une aide financière qui permet à l'organisateur d'assurer l'intendance et la venue des participants extérieurs.

- **Elasticité de surface**, Toulouse, 13-14 novembre 2008, Organisateur A. Ponchet (CEMES), N. Combe (CEMES), P. Müller (CINAM), O. Thomas (IM2NP), 30 participants.
- **Microdiffraction en faisceau blanc : des mesures vers une analyse physique**, Grenoble-ESRF, 24-25 septembre 2009, Organisateur O. Robach (CEA-INAC), B. Devindre (LEM CNRS-ONERA), J-S. Micha (CNRS INAC), 41 participants.
- **Modélisation, caractérisation et fonctionnalisation de surfaces pour la micro-nanomanipulation robotique, atelier conjoint entre les GDR MECANO et Robotique**, Paris-Jussieu, 15-16 juin 2010, Organisateur : Stéphane Regnier (GDR Robotique) et Olivier Thomas (GDR MECANO), 26 participants
- **Mesures de champ aux petites dimensions, atelier conjoint entre les GDR MECANO et MCIMS**, Besançon, 9-10 décembre 2010, Organisateur : Fabien Amiot (FEMTO-ST).
- **Couplage croissance-contraintes-composition**, Marseille, mai 2011, Organisateur : T. Frisch (IM2NP), JM. Roussel (IM2NP), O. Thomas (IM2NP), C. Mottet (CINAM), A. Ponchet (CEMES).
- **Adhésion-collage**, Lyon, octobre 2011, Organisateur : G. Grenet (INL).

4.3. Ecole

Ecole thématique CNRS, « Mécanique des Nano-objets », 14-19 mars 2010, Autrans,

Organisateurs : S. Escoubas (IM2NP), S. Labat (IM2NP), C. Paitel (IM2NP), E. Santacroce (IM2NP), O. Thomas (IM2NP), M. Verdier (SIMAP), O. Robach (CEA-INAC), H. Proudhon (Mines ParisTech), avec le support du service formation de la DR12 du CNRS. 87 participants.

Elle a permis de rassembler 87 chercheurs d'horizons différents (physiciens, mécaniciens, chimistes), de tout niveau du doctorant au chercheur confirmé. Un bilan détaillé comprenant le dépouillement des questionnaires d'évaluation par les participants est fourni en annexe.

Au-delà des participants l'école continue à assurer une diffusion des connaissances plus vaste à travers :

- Le site web sur lequel on peut trouver les fichiers de la plupart des cours :
<http://www.im2np.fr/GDR-Mecano/ecolenano-objets2010/>
- Un ouvrage en anglais issu de l'école est en cours de publication aux presses de l'école des Mines. L'ouvrage collectif « Mechanics of Nano-objects » en cours de publication aux Presses de l'Ecole des Mines de Paris, et qui regroupe sous une forme accessible à un large public l'ensemble du contenu de l'école.

4.4. Participation du GDR à d'autres manifestations

- ***Nanostress Summer school***, Cargese, 29 septembre-5 octobre 2008, Organisateurs : P. Müller et M. Hanbücken (CINAM).
- ***Congrès Français de Mécanique 2009 (CFM'09) – Session Mécanique physique Nano-objets et petites échelles***, Marseille, 24-28 août 2009, Organisateurs : Samuel Forest (Mines Paris), Jean-François Ganghoffer (LEMTA Nancy), Philippe Goudeau (Phymat Poitiers), Olivier Thomas (IM2NP, Marseille).
- ***X-ray coherent diffraction workshop***, Synchrotron SOLEIL, 14-16 décembre 2009, Organisateurs : S. Ravy (SOLEIL), M. de Boissieu (SIMAP), O. Thomas (IM2NP).

5. BILAN FINANCIER

Les chiffres donnés ici sont arrondis afin de ne présenter que les grandes masses du budget.

Budget 2008 :

Dotation du CNRS=10 000 €

Dépenses :

Colloque Marseille mars 2008	4000 €
Ateliers thématique Toulouse novembre 2008	2500 €
Réunions de bureau	2000 €
Missions	1000 €
Total dépenses 2008	9500 €

Budget 2009 :

Dotation du CNRS = 10 000 €

Dépenses :

Colloque Paris avril 2009	4000 €
Atelier thématique Grenoble septembre 2009	2000 €
Atelier thématique Jussieu juin 2009	1200 €
Réunions de bureau	2000 €
Missions	1000 €
Total dépenses 2009	10200 €

Budget 2010 :

Dotation du CNRS = 10 000 €

Dépenses :

Subvention école MECANO mars 2010	3000 €
Ateliers thématique Besançon décembre 2010	3000 €
Réunions de bureau	2000 €
Missions	1000 €
Total dépenses 2010	9000 €

6. BILAN ET PERSPECTIVES

Le GDR MECANO se termine fin 2011. Il est donc encore prématuré d'en tirer un bilan complet. D'autant plus que l'année 2011 sera riche en réunions et ateliers scientifiques (réunion plénière à Poitiers en avril 2011, Atelier Couplage Croissance, Composition, Contraintes à Marseille en mai 2011, atelier Adhésion-collage à Lyon en octobre 2011, et probablement une réunion finale « européenne » en fin d'année). Néanmoins 3 ans est déjà une durée qui permet d'envisager des perspectives.

La problématique de la mécanique aux échelles nanométriques est d'abord d'intérêt fondamental mais elle suscite un fort intérêt de la part des ingénieurs et chercheurs en micro et nano-technologies. Elle bénéficie très clairement d'une approche pluridisciplinaire entre physique, mécanique et chimie. La collaboration entre physiciens et chimistes est traditionnelle dans le domaine des matériaux. L'interaction avec les mécaniciens l'est moins et se révèle très fructueuse (l'intérêt d'un tel rapprochement va bien au-delà de la thématique « nano » comme le montrent les discussions en cours entre la SFP et l'AFM). Cette interaction est incarnée par la présence de collègues mécaniciens au GDR mais aussi par l'interaction avec d'autres GDR à dominante mécanique (GDR MCIMS par exemple).

Pour ce qui est des thématiques du GDR MECANO le bilan à 3 ans fait apparaître qu'elles restent actuelles, en particulier :

- 1) la mécanique aux petites échelles : élasticité et plasticité.
- 2) Les méthodes expérimentales : mesures de champ et essais mécaniques aux petites échelles
- 3) La simulation / modélisation de l'atome au micron. Un outil de plus en plus indispensable pour comprendre les propriétés mécaniques aux échelles ultimes.
- 4) La croissance et l'auto-organisation pilotée par les contraintes.

Il est à peu près admis que l'élasticité ne commence à dépendre de la taille qu'en dessous de quelques nm. Toutefois un certain nombre de résultats publiés récemment font état de résultats surprenants : des modules élastiques de nanofils de diamètres inférieurs à 100 nm seraient modifiés par rapport au massif. Ces résultats déconcertants font encore largement débat. En revanche l'étude de la vibration de nano-objets induite par laser montre plutôt que l'élasticité volumique reste valide jusqu'aux toutes petites échelles. Ces questions sont encore très largement débattues dans la communauté (cf atelier « Elasticité de surface » et école MECANO).

Pour ce qui est de la plasticité aux petites échelles le sujet continue à susciter une recherche active que ce soit dans le domaine des observations expérimentales ou bien de la simulation. Très récemment une équipe allemande a sollicité en traction des nanofils de cuivre de diamètre 100 nm. La rupture de ces fils se fait à la cission critique ce qui corrobore les résultats des années 50 sur les whiskers. Ainsi en l'absence de dislocation la limite élastique devient une caractéristique intrinsèque, indépendante de la taille. En revanche les comportements de ces petits objets en présence de dislocations suscitent encore de nombreuses interrogations. Le faible nombre de dislocations présentes donne lieu à un comportement stochastique qui

met clairement en défaut les lois de comportement valides aux plus grandes échelles. Par ailleurs les débats sur l'activation des sources et la nucléation des dislocations restent ouverts.

La détermination expérimentale des champs de déplacement et de déformation aux échelles sub-microniques et nanométriques restent un sujet de recherche très vivant avec une demande très forte de la microélectronique et, plus largement, des élaborateurs et développeurs de dispositifs. La microscopie électronique continue à faire des progrès remarquables grâce en particulier aux nouveaux microscopes corrigés des aberrations. Les synchrotrons de 3^{ème} génération permettent l'émergence de nouvelles approches très prometteuses comme la micro-diffraction de Laue ou la diffraction cohérente des rayons X. Ces avancées expérimentales rendent encore plus aigus certains problèmes théoriques sous-jacents à l'interprétation : Comment peut-on à partir de champ expérimentaux, remonter à des informations sur les déformations sans faire d'hypothèses ? Jusqu'où peut-on aller dans l'analyse quantitative ? Ces questions, qui se posent à différentes échelles selon les communautés, suscitent actuellement un intérêt croissant pour des discussions croisées entre physiciens et mécaniciens.

L'influence de l'énergie élastique sur la croissance épitaxiale et sur l'auto-organisation reste un sujet de recherche d'actualité. L'inhomogénéité de composition dans les boîtes quantiques est un facteur limitant pour les performances de nombreux dispositifs. Plus récemment c'est le couplage – hautement complexe et non linéaire – entre croissance, composition et élasticité lors de la croissance d'alliages qui nécessite une meilleure compréhension. Cette problématique se pose aussi bien dans les systèmes épitaxiés, que dans les nanoparticules, et concerne tous les types de matériaux.

Des avancées sur l'ensemble de ces questions assez fondamentales ne seront possibles que si les tests mécaniques et les mesures de champ sont confrontés à des modélisations. Ainsi, la simulation des techniques de mesure de champs est devenue un axe de recherche important dans différentes équipes de MECANO pour les années à venir.

Cette liste de questions encore ouvertes n'est pas exhaustive mais elle montre bien que la thématique « mécanique des nano-objets » est un sujet très vivant encore très loin d'être épuisé. L'année 2011 étant la dernière année du GDR MECANO il est important de commencer à préparer la suite. A ce stade, nous pouvons déjà livrer ici les débuts d'une réflexion qui a commencé à se faire au sein du bureau et qui va se prolonger plus largement au sein de la communauté. Une première constatation : les essais mécaniques sur des nano-objets sont encore rares dans la communauté internationale (ce sont des expériences difficiles à mettre en œuvre) et la France est plutôt moins présente que d'autres pays européens (Allemagne, Autriche par exemple) dans ce domaine. Il nous apparaît par conséquent naturel de faire évoluer ce GDR vers un GDR européen. Par ailleurs un nombre important de partenaires actuels de MECANO ont déjà individuellement des collaborations suivies avec des laboratoires européens. La liste ci-dessous montre effectivement que les possibilités sont nombreuses. Bien entendu il reste à cibler quelques partenaires bien choisis car un réseau de trop grande taille serait difficile à faire fonctionner.

Une constatation d'un autre ordre : Il y a un domaine où un GDR est un acteur très bien positionné pour jouer un rôle structurant, c'est celui de la formation. Or, au cours de l'école MECANO, il a été exprimé une

demande d'une grande ampleur pour d'autres actions de formation, et ce aussi bien à un niveau relativement « basique » qu'à un niveau très pointu (cf. bilan de l'école, paragraphe 7). Il nous semble important pour notre communauté de pouvoir poursuivre la dynamique initiée par MECANO dans ce domaine. L'ouverture vers l'Europe ne peut être qu'enrichissante à ce niveau, en élargissant le vivier d'intervenants.

Liste de laboratoires européens concernés par la thématique mecano

Nom	Institution	Pays	Thématique scientifique	Publication commune avec membres Mecano	Publication marquante
Daniel Wagner	Weizmann Institute of Science	Israël	Nanotubes, composites, bio, propriétés mécaniques		THE MATERIAL BONE: Structure-Mechanical Function Relations Annual Review of Materials Science Vol. 28: 271-298 A 1998
Gerhard Dehm/J. Keckes	Univ. Leoben	Autriche	Microscopie électronique, DRX, traction micro-piliers, plasticité	9 publiés avec M. Legros 3 avec O. Thomas	Oh et al Nature Mat 2009 Legros et al Science 2008
Oliver Kraft	KIT, Karlsruhe	Allemagne	Micro-plasticité, fatigue films minces		Kraft et al Plasticity in Small dimensions, Annual Rev Mat Res 2010
Johann Michler	EMPA, Thun	Suisse	Micro tests mécaniques, EBSD, FIB, SEM, nanofils, semi-conducteurs		Zhu et al Mechanics of ultra-strength materials, MRS bull 2009
Thomas Pardoën, JP. Raskin, L. Francis	U. Louvain	Belgique	MEMS pour essais micro-nano--mécaniques		Boe A, Safi A, Coulombier M, et al., MEMS-based microstructures for nanomechanical characterization of thin films , SMART MATERIALS & STRUCTURES 18, 115018 (2009)
Henny Zandbergen	TU Delft	Pays-Bas	TEM		Cava et al Nature 1994 Storm et al Nature Mat 2003

Erik Bitzek	U. Erlangen	Allemagne	Plasticité des nanomatériaux		E. Bitzek, C. Brandl, D. P.M., and H. Van Swygenhoven. Dislocation cross-slip in nanocrystalline fcc metals. Phys. Rev. Lett., 100:235501, 2008.
R. Spolenak	ETH Zurich	Suisse	Nano-bio mechanical interfaces,	Legros et al MRS 2005,	Arzt et al 2003 PNAS
E. Mittemeijer/G. Richter	MPI Stuttgart	Allemagne	DRX, nanofils métalliques		Richter G., Hillerich K, Gianola DS, et al., Ultrahigh Strength Single Crystalline Nanowhiskers Grown by Physical Vapor Deposition, NANO LETTERS 9, 3048 (2009)
H. Van Swygenhoven	PSI	Suisse	Plasticité des nano	Gianola et al Acta Mat 2006	R. Maaß, S. Van Petegem, H. Van Swygenhoven, P. M. Derlet, C. A. Volkert, and D. Grolimund. Time-resolved laue diffraction of deforming micropillars. Physical Review Letters, 99(14), 10 2007.
C. Volkert	U. Göttingen	Allemagne	Traction nanofils, Pilliers, FIB		Volkert Lilleodden, Phil Mag 2006
P. Gumbsch	Fraunhofer Freiburg/KIT	Allemagne	DM Microscale plasticity		C. Motz, D. Weygand, J. Senger, and P. Gumbsch. Initial dislocation structures in 3-d discrete dislocation dynamics and their influence on microscale plasticity. Acta Materialia, 57(6):1744–1754, 2009.

D. Raabe	MPI Düsseldorf	Allemagne	Microstructure, nano cristaux métalliques, déformation plastique		Song et al Acta Mat 2005
A. Wilkinson	U. Oxford	Royaume Uni	EBSD		M. Kamaya, A. J. Wilkinson, and J. M. Titchmarsh. Quantification of plastic strain of stainless steel and nickel alloy by electron backscatter diffraction. Acta Materialia, 54(2):539–548, 1 2006.
I. Robinson	Univ. College	Royaume Uni	DRX cohérente		Robinson I, Harder R, Coherent X-ray diffraction imaging of strain at the nanoscale , Nature Materials 8, 291 (2009)
E. Poulsen	Risö	Danemark	DRX 3D		B. Jakobsen, H. F. Poulsen, U. Lienert, and W. Pantleon. Direct determination of elastic strains and dislocation densities in individual subgrains in deformation structures. Acta Materialia, 55(10):3421–3430, 2007.
L. Miglio	U. Milano	Italie	Relaxation plastique des heterostructures	Publication en cours avec B. Devincere	R. Gatti, A. Marzegalli, V. A. Zinovyev, F. Montalenti, and L. Miglio. Modeling the plastic relaxation onset in realistic size islands on $Si(001)$. Physical Review B, 78(18), 11 2008.
E. van der Giessen	U. Gröningen	Pays-Bas	Simulation DD		Van der Giessen, Needleman Modelling and Simulation in

					Materials Science 1995 "Discrete dislocation plasticity: a simple planar model"
J. Frenken	Kamerlingh Onnes lab., Leiden	Pays-Bas	Nanostriction, superlubricité		Filippov AE, Dienwiebel M, Frenken JWM, et al. Torque and twist against superlubricity , PRL 100, 046102 (2008)

ANNEXE 1

Synthèse de l'atelier *Elasticité de surface*, Toulouse, 13-14 novembre 2008,

Organisateurs A. Ponchet (CEMES), N. Combe (CEMES), P. Müller (CINAM), O. Thomas (IM2NP)

GDR MECANO
Synthèse des journées thématiques "Elasticité de surface"
les 13 et 14 Novembre 2008 à Toulouse

Ces premières journées thématiques ont réuni plus d'une trentaine de participants, dont 22 non toulousains représentant une douzaine de laboratoires.

Les deux demi-journées se sont articulées autour de dix interventions orales, suivies par de longues discussions.

Schématiquement les interventions ont été regroupées autour de 3 grands thèmes :

- 1) Qu'est ce que l'élasticité de surface, le surface stress, le surface strain ?... dans le cadre l'élasticité des milieux continus (P. Müller, J. Olives, S. Forest et Y. Girard)

- 2) Modélisation atomistique des effets de l'élasticité de surface dans des particules (N. Combe/PM Chassaing, C. Mottet) ou des plaques (P. Valat), des propriétés élastiques d'interfaces (O. Thomas)

- 3) Mesures des propriétés élastiques de surface ou d'interface (B. Croset, diffraction X ; P. Djemia, diffusion Brillouin)

Pour le contenu des interventions, on peut se reporter aux fichiers qui seront mis en ligne sur le site de MECANO.

Quelques généralités :

Tout d'abord, il convient dans le cadre du GDR de définir une terminologie commune ; le français étant ambigu ici, il est préférable d'adopter la terminologie anglaise. P. Müller propose que la notion de « tension de surface » qui est parfois interprétée comme une énergie, parfois comme une contrainte, soit strictement réservée aux liquides et rappelle que pour les solides :

- Les grandeurs définies à la surface (surface energy, surface strain, surface stress) sont des grandeurs d'excès provoqués par la discontinuité du matériau en surface.
- L'énergie de surface ou « surface energy » correspond au travail de création d'une surface à déformation constante (rupture des liaisons chimiques). C'est une grandeur scalaire.
- La contrainte de surface ou « surface stress » correspond aux forces entre atomes de surface, et on peut montrer que le « surface stress » est lié à la dérivée de l'énergie de surface par rapport à la déformation de volume (cf Shuttleworth 1950). C'est une grandeur tensorielle.
- Le moteur d'une reconstruction est essentiellement la réduction de l'énergie de surface. Il peut en résulter a priori aussi bien une augmentation qu'une diminution du surface stress.

Enfin une problématique équivalente se retrouve aux interfaces avec la notion d' « interfacial strain » liée à la discontinuité entre matériaux. (Les interfaces peuvent aussi être diffuses et présenter des constantes élastiques effectives qui ne sont pas forcément linéaires par rapport à celles des deux matériaux en présence, cf exposés O. Thomas, P. Djémia).

Les discussions ont principalement porté sur deux points :

Comment décrire l'élasticité de surface ?

En dessous de quelle taille est-ce nécessaire de la prendre en compte ?

Formellement l'élasticité de surface est intégrée à une description de type continue via des tenseurs de surface (P. Müller). Celle-ci revient à décrire tout le nano-objet comme un volume homogène, et à ramener tout l'effet de surface à la seule surface. La difficulté réside alors dans la connaissance du ,surface stress, difficile à mesurer ! En pratique, on mesure ou on calcule généralement des coefficients élastiques moyens ou « effectifs » (exposé P. Valat). Une autre approche consiste à modéliser les nano-objets à l'échelle atomique, via des méthodes principalement semi-empiriques (l'ab-initio étant trop limité en taille) qui permettent de déterminer la position atomique de chaque atome. Cette description ne sépare pas, quant-à-elle, les effets de volume et de surface. Il en résulte un étalement visible des effets de surface à l'intérieur du nanoobjet. Une difficulté peut provenir de la validité des potentiels utilisés. Y-a-t-il une divergence entre ces deux descriptions ? Il semble que non. Pour confirmer que ces deux approches sont équivalentes, il serait intéressant de voir sur plusieurs systèmes si le comportement élastique modélisé atomistiquement peut être reproduit par le modèle continu (comprenant les tenseurs de volume et de surface). B. Crozet fait état de l'excellente convergence entre élasticité et modélisation atomistique pour les déplacements induits par des plots ou des marches en surface (ceux-ci étant représentés par des forces en surface). Enfin les approches consistants à décrire les effets de surface par un découpage artificiel en 2 matériaux (de type coeur-coquille) n'ont pas de réel fondement physique (hormis bien entendu le cas où il y aurait vraiment deux structures différentes).

Finalement la question à laquelle il faut maintenant répondre serait plutôt celle de la taille en dessous de laquelle l'élasticité de surface est susceptible de provoquer des écarts à l'élasticité volumique. En d'autres termes, un peu provocateurs, on peut se demander si cela vaut le coup de se donner autant de mal ! C'est la question qui a été le plus discutée, mais à laquelle les réponses sont encore largement incomplètes :

- Les exposés de modélisations atomistiques de type semi-empiriques présentés ici montrent des écarts à l'élasticité continue volumique pour des tailles d'objets (particules ou plaques) en dessous de 2 à 3 nm. La zone d'étalement des effets de surface (telle qu'on peut la voir en modélisation) est alors du même ordre de grandeur que l'objet lui-même ! Dans de tels cas la notion de grandeur d'excès perd sa pertinence.

- Ces écarts peuvent se manifester par une modification des constantes élastiques « apparentes » en fonction de la taille (exposé P. Valat), ou une non linéarité de certaines propriétés élastiques (ex. fréquences de vibration acoustique de particules en fonction de la taille, exposé N. Combe), ou un gradient de pression interne (exposé C. Mottet).

- Dans les divers cas présentés lors de ces journées, il s'avère que les effets modélisés liés à la taille de nano-objets n'ont pas encore été mis en évidence expérimentalement, car les objets existants sont à la limite des tailles critiques. Un des challenges rencontrés est donc de mettre en évidence expérimentalement de tels effets.

- Par contre, l'effet de l'élasticité de surface est observé expérimentalement par exemple sur des surfaces vicinales (B. Crozet).

Sur ce sujet, il ressort également un paradoxe entre les tailles limites évoquées ici et celles reportées dans plusieurs articles récents concernant des nanofils [1-4], qui reportent des modules de Young apparent variant de 30 ou 50 % avec le diamètre du fil, avec des effets visibles dès 100 ou 200 nm ! L'origine de cet effet est-il le même que celui décrit ci-dessus ? Peut-être pas. Peut-il être induit par l'élaboration ? les protocoles de mesure du module de Young ?... ou s'agit-il d'un réel effet de taille pouvant être décrit par l'élasticité de surface ?

D'autre part les énergies mises en jeu sont extrêmement faibles. Pour reprendre la métaphore de P. Müller, mesurer l'énergie liée au « surface stress » dans un système donné c'est un peu comme chercher quelle est la masse de l'écusson cousu sur la casquette du capitaine d'un pétrolier....

Il est également signalé que des effets non linéaires existant dans la théorie continue (grands déplacements, gradients d'ordre supérieur...) mais souvent négligés en pratique peuvent avoir une influence au moins aussi grande que les effets de surface. Signalons également qu'en restant dans le cadre de l'élasticité volumique des milieux continus, la prise en compte des gradients du déplacement d'ordre 2 et 3 permet de mettre en évidence des effets de taille, par exemple la contrainte en bord de trou dépend de la taille du trou (S. Forest). Enfin le rôle du surface stress sur les propriétés des nano-objets est rapidement évoqué. Une situation où il est probable qu'il joue un rôle est la croissance épitaxiale, où il pourrait contribuer à stabiliser des facettes de bas indices a priori instables [5].

En conclusion,

- i) l'élasticité des milieux continus s'avère particulièrement robuste jusqu'à des tailles très petites, de l'ordre de quelques distances interatomiques
- ii) on est dans ce cas capable de décrire physiquement l'effet de la surface sur les propriétés élastiques, que ce soit dans le cadre de modèles continus ou dans le cadre de modélisations atomistiques
- iii) une taille critique est par contre atteinte lorsque la zone d'étalement des effets de surface devient du même de grandeur que l'objet (typiquement 2 à 3 nm) ; dans ce cas la modélisation atomistique semble l'approche physiquement la plus pertinente. La mise en évidence expérimentale de cette taille critique reste cependant à faire !

[1] Chen, C.Q.; Shi, Y.; Zhang, Y.S.; Zhu, J. & Yan, Y.J., Size Dependence of Young's Modulus in ZnO Nanowires, Physical Review Letters, 2006, 96, 075505

[2] He, J. & Lilley, C.M. Surface Effect on the Elastic Behavior of Static Bending Nanowires Nanoletters, 2008, 8, 1798-1802

[3] Cuenot, S.; Frétiigny, C.; Demoustier-Champagne, S. & Nysten, B., Surface tension effect on the mechanical properties of nanomaterials measured by atomic force microscopy Phys. Rev. B, 2004, 69, 165410

[4] Ravi Agrawal, Bei Peng, Eleftherios E. Gdoutos, and Horacio D. Espinosa, Elasticity Size Effects in ZnO Nanowires - A Combined Experimental-Computational Approach, Nano Letters 2008, 8, 3668-3674

[5] V. Shenoy, L. Freund, J. Mech. Phys. of Solids 50 (2002) 1817-1841

Liste des interventions des Journées Thématiques "Elasticité de surface" du GDR MECANO

P. Müller Elasticité de surface

J. Olives Thermodynamique des surfaces, travail de déformation, contraintes de surface ; équations aux surfaces et lignes triples

S. Forest Théorie du second gradient et effets de surface : une lecture de quelques oeuvres de

Mindlin

Y. Girard Modèle de Frenkel Kontorova étendu aux alliages de surface

N. Combe et P.M. Chassaing Effets de surface et Modes de vibration de nanoparticules

C. Mottet Les déformations dans les nanoparticules métalliques par simulation numérique.

P.Valat Etude par simulation atomistique de l'élasticité de couches minces nanométriques de tungstène

O. Thomas Relation entre contrainte et composition dans des multicouches et influence de forts gradients de composition.

B.Croset Surfaces nanostructurées périodiques : apport des rayons X en incidence rasante et de l'élasticité linéaire anisotrope

P. Djemia Application de la diffusion Brillouin à la mesure des propriétés élastiques de surface ou d'interface : le cas des multicouches ou des nano-objets

Liste des Participants aux Journées Thématiques "Elasticité de surface" du GDR MECANO

Fabien Amiot FEMTO Besançon

Nadim Alayli LEM/ONERA Paris

Nicholas Blanchard INL Lyon

Marie-José Casanove CEMES Toulouse

Pierre-Marie Chassaing CEMES Toulouse

Fabien Cheynis CINAM Marseille

Nicolas Combe CEMES Toulouse

Nicolas Cordero CM/Mines Paris

Bernard Croset INSP Paris

François Demangeot CEMES Toulouse

Thierry Devers PRISME/SEISME Orléans

Philippe Djemia LPMTM Paris

Lise Durand CEMES Toulouse

Julien Durinck PHYMAT Poitiers

Damien Faurie LPMTM Paris

Chantal Fontaine LAAS Toulouse

Samuel Forest CM/Mines Paris

Christophe Gatel CEMES Toulouse

Yann Girard LMPQ Paris

Geneviève Grenet INL Lyon

Jesse Groenen CEMES Toulouse

Myrthil Khan LCC Toulouse

Marc Legros CEMES Toulouse

Frédéric Leroy CINAM Marseille

Christine Mottet CINAM Marseille

Pierre Müller CINAM Marseille

Juan Olives CINAM Marseille

Laurent Pizzagalli PHYMAT Poitiers

Anne Ponchet CEMES Toulouse

Geoffroy Prévot INSP Paris

André Rocher CEMES Toulouse
Christian Roucau CEMES Toulouse
Hao Tang CEMES Toulouse
Olivier Thomas IM2NP Marseille
Pascale Valat PHYMAT Poitiers
François Willot Mines Paris

ANNEXE 2

Synthèse de l'atelier *Microdiffraction en faisceau blanc : des mesures vers une analyse physique, Grenoble-ESRF, 24-25 septembre 2009,*

Organisateurs O. Robach (CEA-INAC), B. Devincere (LEM CNRS-ONERA), J-S. Micha (CNRS INAC)

L'atelier "Microdiffraction en faisceau blanc : des mesures vers une analyse physique" a rassemblé une quarantaine de participants, dont environ deux tiers avaient déjà utilisé la technique.

L'atelier s'articulait autour de deux objectifs :

- préciser les conditions d'application d'une analyse automatisée des données (cartographies), restreinte à une analyse des déformations élastiques locales (à l'échelle micronique, voire sub-micronique)
- examiner les processus physiques de déformation plastique, et évaluer les méthodes existantes pour extraire de l'information quantitative sur les déformations plastiques à partir des formes des pics de diffraction, dans une analyse plus "manuelle" et prospective. Une des difficultés pour cette analyse est qu'elle demande aux spécialistes des mesures locales par diffraction des rayons X d'acquérir la culture sur les dislocations traditionnellement plutôt détenue par les spécialistes de microscopie électronique.

Il convenait également d'examiner les techniques de diffraction "monochromatique" fournissant des informations complémentaires, pour comparer leur domaine d'application (ex: qualité cristalline des échantillons, densité de grains), et évaluer le degré d'avancement des méthodes d'analyse associées concernant les déformations plastiques. L'idée sous-jacente étant d'examiner quelles parties des concepts et du formalisme d'analyse sont récupérables d'une technique à l'autre, en vue de l'adoption d'une base d'outils communs.

Après une introduction des objectifs du GdR Mécano par O. Thomas, et une présentation par F. Rieutord des développements instrumentaux récents sur la station de microdiffraction Laue de BM32 à l'ESRF, une première session centrée sur la plasticité a eu lieu. L'objectif était de présenter deux des grandes approches pour la description des déformations plastiques. Tout d'abord l'approche micromécanique, avec un exposé d'O. Castelnau sur le comportement des polycristaux à des échelles allant du micron au mm. Cet exposé a été l'occasion de rappeler les bases de l'interprétation mécanique des mesures de diffraction X. Ensuite l'approche "physique" sur les mécanismes élémentaires, avec un exposé de J. Thibault-Pénisson rappelant les étapes historiques de la mise en évidence par la microscopie électronique des dislocations, de leur mouvement, et de leur interaction avec un joint de grains "initialement simple". La combinaison de différentes techniques MET (conventionnelle, in-situ pendant un essai mécanique, haute résolution) a permis d'élucider bon nombre de mécanismes élémentaires jusqu'à l'échelle atomique

Ces bases de description physique à différentes échelles étant rappelées, une seconde session a eu lieu, dédiée à l'influence des défauts de structure liés à la plasticité sur les taches de diffraction, et inversement au problème de la sensibilité de la détection de ces défauts par diffraction des rayons X en fonction du type de défaut, et aux capacités de la diffraction des rayons X à caractériser sans ambiguïté la géométrie et les arrangements de ces défauts.

G. Monnet a rappelé les premières tentatives menées en ce sens dans le groupe de T. Ungar, pour interpréter les asymétries des pics de diffraction haute résolution en terme d'un arrangement des dislocations en cellules. Cette analyse repose une prédiction faite par Mughrabi sur la nature des contraintes internes induites par les microstructures de dislocations : le cristal est comprimé à l'intérieur des murs de dislocations et dilaté au centre des cellules de dislocation.

B. Devincré a ensuite décrit les principaux types de microstructures de dislocations, et la terminologie associée, ainsi que les méthodes mathématiques pour décrire de façon continue la densité de

"dislocations géométriquement nécessaires" (GNDs en anglais pour Geometrically Necessary Dislocations). S. Labat a ensuite décrit les hypothèses utilisées pour calculer la distribution des intensités diffractées dans l'espace réciproque produite par ces microstructures, et montré des exemples d'analyse de forme des taches en microdiffraction issus des travaux de R.I. Barabash et al.

Une discussion s'en est suivie sur la nécessité ou non d'obtenir des informations complémentaires hors diffraction des rayons X (ex. par microscopie électronique) pour lever certaines ambiguïtés sur le type de microstructure de dislocations présent. Le problème étant de dépasser le stade d'une description purement géométrique de type "fonction de distribution d'orientation", pour passer à une description physique de la distribution de défauts, avec une mesure fiable de la densité de dislocations.

La session poster a permis aux participants de prolonger la discussion autour d'exemples concrets d'études par microdiffraction.

La session 3 était dédiée aux techniques, avec tout d'abord une partie sur les techniques en faisceau monochromatique et l'extension au 3D de la microdiffraction Laue, puis une partie d'examen en détail de la microdiffraction Laue.

J. Wright a décrit la technique de 3D-XRD, qui combine des clichés de diffraction de poudre à haute énergie mesurés sur deux détecteurs situés à différentes distances de l'échantillon, pour remonter par triangulation à la position 3D des grains diffractants. Il a discuté notamment de l'usage d'un 3ième détecteur pour tenter de séparer les élargissements de taches provenant des déformations plastiques, de ceux provenant de la forme des grains. Il a également présenté le projet FABLE qui tente de réunir sous un même formalisme les logiciels d'analyse correspondant à différentes techniques de diffraction des rayons X, en vue de fournir un logiciel libre aux utilisateurs.

W. Ludwig a décrit la technique d'acquisition simultanée d'une image de l'échantillon dans l'espace direct par radiographie et du cliché de diffraction dans l'espace réciproque, combinant ainsi la tomographie et la détermination des orientations et déformations élastiques locales.

P. Bleuët a décrit les premières tentatives d'obtention de résolution 3D sur un microobjet en microdiffraction Laue par combinaison d'une rotation de l'échantillon et d'un balayage perpendiculaire au faisceau.

Pour la partie sur la microdiffraction Laue, J.S. Micha a rappelé les différents ingrédients intervenant dans le calcul d'un diagramme de Laue, et les grandes étapes de l'analyse des diagrammes, en insistant sur la mise au point nécessaire de seuils de décision adaptés pour la sélection des pics et l'indexation, qui conditionne la qualité de l'analyse. Il a également décrit différentes méthodes disponibles pour l'indexation. O. Robach a ensuite tenté d'évaluer les incertitudes sur les mesures de déformations élastiques en faisceau blanc, par deux méthodes : d'une part en traçant les distributions statistiques des solutions exactes obtenues en choisissant 4 pics sur les N disponibles dans un diagramme donné. Et d'autre part en comparant théorie et expérience sur un cas "idéal" de traction in situ dans le domaine élastique d'un polycristal à comportement mécanique isotrope (tungstène). Deux exposés d'exemples d'application de la technique ont suivi, avec O. Sicardy (électrolytes solides pour piles à combustible) et H. Palanchar (UO₂ irradié).

Une session de démonstration commentée des logiciels d'analyse a finalement eu lieu. O. Robach a présenté un exemple d'utilisation de XMAS (logiciel développé par N. Tamura à l'ALS et disponible sur <http://xraysweb.lbl.gov/microdif/>), en soulignant la disponibilité d'utilitaires Python permettant de reproduire les résultats de XMAS pour orientations et déformations (sur demande). J.S. Micha a présenté la série de modules Python "LaueTools" en cours de développement, disponibles librement sur le site de SourceForge (<http://sourceforge.net/projects/lauetools/>). Cette série vise à fournir une alternative "opensource" à XMAS, tout en offrant plus de flexibilité pour l'ajout de modules spécifiques à un problème physique donné (ex : macles). Les contributeurs ont la possibilité de soumettre leur codes et de modifier

ceux actuellement existants. Une interface graphique permet d'utiliser une partie des modules (indexation et simulation). A l'issue de cette session, une discussion a eu lieu concernant la contribution future des utilisateurs-développeurs à l'amélioration de LaueTools. L'ajout de modules plus orientés vers la physique, e.g. les modules de simulation de la diffraction par des microstructures de dislocations, est particulièrement souhaité. L'importance capitale d'une documentation des modules et du code a aussi été soulignée (notamment les repères des transformations).

En conclusion, cet atelier a permis de fournir quelques réponses aux questions soulevées par les participants lors des inscriptions. Notamment en microdiffraction Laue, pour "démystifier" l'analyse des largeurs de pics et préciser les conditions d'obtention de mesures de déformations élastiques fiables, et plus généralement, pour comparer les domaines d'application des différentes techniques. Une base de logiciels "open source" gérant la partie purement géométrique de l'analyse des diagrammes de Laue est en place. Elle devrait permettre aux expérimentateurs de dépasser plus facilement la barrière de la géométrie pour s'attaquer aux diagrammes avec des formes de pics complexes, qui représentent une fraction importante des données. Comme perspectives on peut citer l'insertion des résultats issus des simulations par dynamique de dislocations dans le calcul des formes de pics, et des réunions de concertation à prévoir entre développeurs de codes pour faciliter le "recollage" entre les modules.

ANNEXE 3

**Bilan de *Ecole thématique CNRS, « Mécanique des Nano-objets »*, 14-19 mars 2010,
Autrans,**

Organisateurs :

S. Escoubas (IM2NP), S. Labat (IM2NP), C. Paitel (IM2NP), E. Santacroce (IM2NP), O. Thomas (IM2NP), M. Verdier (SIMAP), O. Robach (CEA-INAC), H. Proudhon (Mines ParisTech), avec le support du service formation de la DR12 du CNRS. 87 participants.

Un ouvrage en anglais issu de l'école est en cours de publication aux presses de l'école des Mines.

**Bilan de l'Ecole Thématique CNRS
« Mécanique des Nano-Objets »
Autrans 14 – 19 mars 2010**



Délégation organisatrice : DR12

Institut Scientifique commanditaire : INP

Sommaire

Comité d'organisation

Comité scientifique

Contexte et Objectifs de l'école

Programme

Public

Synthèse de l'évaluation par les participants à l'issue de la formation

Budget

Conclusion

Comité d'organisation

Stéphanie Escoubas, IM2NP, Marseille
Stéphane Labat, IM2NP, Marseille
Cathy Paitel, IM2NP, Marseille
Henry Proudhon, Mines ParisTech, Paris
Odile Robach, CEA INAC, Grenoble
Evelyne Santacroce, IM2NP, Marseille
Patricia Scardigli, CNRS, Formation Permanente, DR PACA
Olivier Thomas, IM2NP, Marseille
Marc Verdier, SiMAP, Grenoble

Comité Scientifique

Olivier Castelnau, LPMTM, Villetaneuse
Benoit Devincré, LEM ONERA, Chatillon
Samuel Forest, Mines ParisTech, Paris
Patrice Gergaud, CEA/LETI, Grenoble
Philippe Goudeau, PHYMAT, Poitiers
Christine Goyhenex, IPCMS, Strasbourg
Geneviève Grenet, INL, Lyon
Christine Mottet, CINA M, Marseille
Pierre Müller, CINA M, Marseille
Anne Ponchet, CEMES, Toulouse
Olivier Thomas, IM2NP, Marseille

Nom du porteur du projet

Olivier Thomas, IM2NP, Marseille

Contexte et Objectifs de l'école

L'étude de l'influence de la réduction de taille sur les propriétés physiques constitue un des grands objectifs des nanosciences. En particulier l'évaluation des propriétés mécaniques des nano-objets est un sujet d'étude en pleine expansion qui pose des questions à la fois théoriques et expérimentales : Comment décrire l'élasticité aux échelles nanométriques ? Quelle est l'influence des défauts résiduels, des surfaces... sur la plasticité de ces objets ? Comment tester les propriétés mécaniques de nano-objets ? Comment mesurer des champs de déformations aux échelles nanométriques ? ... Au-delà de l'intérêt fondamental à comprendre et décrire ces propriétés mécaniques aux échelles ultimes, la maîtrise de ces propriétés est également un enjeu important pour la conception, la fabrication et la fiabilité de nano-dispositifs innovants (« strain engineering » pour l'optimisation de la mobilité des porteurs ou des structures de bandes, contrôle de l'anisotropie magnétique, auto-organisation, NEMS,...).

Cette école thématique du CNRS "MECANO" vise, à partir d'un enseignement des fondamentaux de la mécanique des nano-objets (élasticité, plasticité) et de leur croissance, à aborder les derniers développements concernant les propriétés mécaniques aux échelles ultimes. Elle s'adresse aux doctorants, chercheurs et ingénieurs de la recherche publique et de l'industrie. Cette école s'appuie sur la communauté organisée dans le cadre du GdR MECANO (GdR CNRS 3180) qui développe une approche pluridisciplinaire sur la « Mécanique des nano-objets » auprès de physiciens, mécaniciens et chimistes.

Grands axes du programme :

Le programme comprend trois sessions principales plus un module de rappel.

I – Les fondamentaux : outils pour comprendre les effets de taille en mécanique

II – Propriétés mécaniques et analyse des nano-objets

III – Applications : MEMS et NEMS, Microélectronique, Ingénierie des contraintes

Modalités pédagogiques

Durée : 5 jours, du dimanche 18h au vendredi 13h.

Soit 9 demi-journées de 3h30 de cours et 30 mn de pause.

Introduction et bilan	2 heures
Cours	19 heures
Travaux dirigés, ateliers	6 heures
Exposés et Affiches	4,5 heures
<i>Total</i>	31,5 heures

Programme

	Lundi 15 mars	Mardi 16 mars	Mercredi 17 mars	Jeudi 18 mars	vendredi 19 mars
8h30 - 9h40	Introduction à l'Ecole (<i>O. Thomas</i>) Les Nano-objets réels structure et propriétés <i>A. Ponchet</i> (<i>CEMES CNRS</i>)	Simulation I : Fondements <i>F. Willaime</i> (<i>CEA</i>)	Simulation II : Nano- objets <i>L. Pizzagalli</i> (<i>SP2MI</i>)	Contraintes, thermodynamique et diffusion <i>Y. Le Bouar</i> (<i>LEM CNRS ONERA</i>)	Semi-conducteurs : ingénierie des contraintes <i>H. Mariette</i> (<i>Inst. Neel CNRS</i>)
9h40 - 10h50	Elasticité I : fondements <i>A. Danescu</i> (<i>ECL</i>)	Plasticité II: nano- objets <i>M. Legros</i> (<i>CEMES CNRS</i>)	Sollicitation nano-objets <i>M. Verdier</i> (<i>SIMaP CNRS</i>)	Mécanique des polycristaux <i>O. Castelnaud</i> (<i>LPMTM CNRS</i>)	Nanostructures magnétiques: croissance, structure, propriétés <i>V. Etgens</i> (<i>INSP CNRS</i>)
10h50 11h20	PAUSE	PAUSE	PAUSE	PAUSE	PAUSE
11h20 - 12h30	Plasticité I : les fondements <i>S. Forest</i> (<i>Mines ParisTech CNRS</i>)	Mécanique de la rupture: effets de taille <i>E. Barthel</i> (<i>SVI CNRS Saint Gobain</i>)	Vibrations des nano- objets <i>N. Combe</i> (<i>CEMES</i>)	Métallurgie physique: nanostructuration & ppts mécaniques <i>O. Bouaziz</i> (<i>Arcelor Mittal</i>)	Table Ronde Bilan
12h30 16h00	Repas et temps libre	Repas et temps libre	Repas et temps libre	Repas et temps libre	Repas et retour
16h00 - 17h30	Elasticité II : Nano- objets <i>B. Croset</i> (<i>INSP CNRS</i>)	Introduction aux Elements Finis <i>R. Fortunier</i> (<i>EMSE</i>)	TD Elements Finis Cristallins <i>H. Proudhon</i> (<i>Mines ParisTech CNRS</i>)	TD MicroLaue <i>O. Robach</i> (<i>CEA INAC</i>)	
17h30 18h00	PAUSE	PAUSE	PAUSE	PAUSE	
18h00 - 19h00	Dislocations & dynamique des dislocations <i>B. Devincere</i> (<i>LEM CNRS</i>)	Microscopie électronique & déformations locales <i>J. Thibault</i> (<i>IM2NP CNRS</i>)	Mécanique et microélectronique <i>V. Fiori</i> (<i>STMicroelectronics, Crolles</i>)	Oxydes: croissance & contraintes <i>G. Saint Giron</i> (<i>INL CNRS</i>)	
19h00 - 20h00	Posters	Diffraction X & déformations locales <i>S. Labat</i> (<i>IM2NP CNRS</i>)	MEMS et NEMS <i>Ph. Andreucci</i> (<i>CEA LETI</i>)	Séminaires	

Public

L'Ecole a accueilli **87 physiciens et mécaniciens** (2 inscrits ne se sont pas présentés, 1 intervenant a dû se désister pour raison médicale).

L'origine des participants se décline ainsi :

- 58 chercheurs et enseignants chercheurs (5 EPIC, 14 Universités, 39 CNRS) ; soit 67 %
- 27 doctorants ou postdoctorants CNRS ou des Universités ; soit 31 %
- 2 chercheurs de l'industrie ; soit 2 %

On peut noter qu'environ 10 % des participants sont de nationalité étrangère. 33 personnes rémunérées par le CNRS ont participé à cette formation soit 39% des participants.

La liste nominative est donnée ci-dessous.

ALVO	Sébastien	CNRS Doctorant ou postdoc	Institut des Systèmes Intelligents et Robotique (ISIR)
ALZATE	Lina	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	Laboratoire SVI saint-gobain CNRS
ANDREUCCI	Philippe	Conférencier invité	CEA/LETI/DIHS
ARDILA	Gustavo	Université (chambre double)	INPG Minatec Grenoble
ARRAZAT	Brice	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	Ecole des Mines de Saint-Etienne
BARTHEL	Etienne	Conférencier invité	Surface du Verre et Interfaces
BEAUVAIS	Muriel	CNRS Chercheur	CNRS-UMR 125
BEUTIER	Guillaume	CNRS Chercheur	SIMAP Grenoble
BODDAERT	Xavier	Universités (chambre single)	Ecole des Mines de St Etienne - Centre Microélectronique de Provence
BOUAZIZ	Olivier	Conférencier invité	ArcelorMittal Research
BOUSCAUD	Denis	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	LPMM - Arts et Métiers ParisTech
CASANOVE	Marie-José	CNRS Chercheur	CEMES
CASTELNAU	Olivier	CNRS Chercheur	CNRS
CHANG	Hyung-Jun	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	Centre des Matériaux, Mines Paris Tech
CIPRIANI	Fabrice	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	ESTEC
COMBE	Nicolas	Conférencier invité	Centre d'Elaboration de Materiaux et d Etudes Structurales

CORDERO	Nicolas	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	Centre des Matériaux - Mines Paristech
CROSET	Bernard	Conférencier invité	Institut des Nanosciences de Paris
DANESCU	Alexandre	Conférencier invité	Ecole Centrale de Lyon
DAVEAU	Gaël	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	LEM (ONERA/CNRS)
DE CRECY	François	Industriel et EPIC	CEA
DELATTRE	Roger	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	IM2NP
DEMANGEOT	françois	Universités (chambre double)	Université de Toulouse et CEMES
DEVINCRE	Benoit	Conférencier invité	Laboratoire d'Etudes des Microstructures (UMR104)
DJAZIRI	Soundes	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	Laboratoire de Physique des Matériaux Université de Poitie
DOQUET	Véronique	CNRS Chercheur	CNRS DR5
DURINCK	Julien	Universités (chambre double)	PHYMAT (laboratoire de PHYsique des MATériaux)
ESCOUBAS	Stéphanie	Universités (chambre single)	IM2NP
ETGENS	Victor	Conférencier invité	Institut des Nanosciences de Paris
EZZAIDI	YASSINE	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	IM2NP
FAVERO	Ivan	CNRS Chercheur	Matériaux Phénomènes Quantiques CNRS/Université Paris Di
FENDLER	Manuel	Industriel et EPIC	CEA
FIORI	Vincent	Conférencier invité	STMicronics
FOREST	Samuel	Universités (chambre single)	Mines ParisTech
FORTUNIER	Roland	Conférencier invité	Ecole des Mines de Saint-Etienne, centre SMS
FOUET	Julie	CNRS Doctorant ou postdoc	IM2NP
FOURNEL	Frank	Industriel et EPIC	CEA Grenoble
GAUDEAU	Gaylord	CNRS Doctorant ou postdoc	IM2NP
GERGAUD	Patrice	Industriel et EPIC	CEA - LETI, MINATEC
GODET	Julien	Universités (chambre double)	PHYMAT
GOUBAULT DE BRUGIERE	Baptiste	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	Commissariat à l'Energie Atomique (CEA)
GRACHEV	Sergey	CNRS Chercheur	Unité Mixte CNRS/Saint-Gobain
GRENET	Geneviève	CNRS Chercheur	CNRS DR7

GUENOLE	Julien	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	Université de Poitiers - Laboratoire de Physique des Matériaux
GUERAIN	Mathieu	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	LEMMA Université La Rochelle
GUILLON	Samuel	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS-CNRS)
GUIN	Jean-pierre	CNRS Chercheur	CNRS - Délégation Bretagne et Pays de la Loire
JAUFFRES	David	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	SIMAP - GPM2
KOUMELA	Alexandra	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	CEA
LABAT	Stephane	Universités (chambre single)	IM2NP
LE BOUAR	Yann	Conférencier invité	ONERA
LEBEDKINA	Tatiana	CNRS Chercheur	Institut Jean Lamour - UMR 7198 - SI2M
LEGROS	Marc	Conférencier invité	CEMES-CNRS
LENG	Jacques	CNRS Chercheur	CNRS
LEROY	Frédéric	Universités (chambre single)	CINaM-CNRS
MANDRILLON	Vincent	Industriel et EPIC	CEA
MARIETTE	Henri	Conférencier invité	Institut Néel / CNRS
MEGE	Fabrice	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	SIMAP
MERCIER	David	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	CEA Grenoble
MEZIN	André	CNRS Chercheur	UMR CNRS 7198 Institut Jean Lamour
MICHA	Jean-sébastien	CNRS Chercheur	ESRF CNRS Grenoble
MOMPIOU	Frederic	CNRS Chercheur	cemes-cnrs
MONTAGNE	Alex	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	Laboratoire de Physique des Matériaux
MOTTET	Christine	CNRS Chercheur	CNRS
MULLER	Pierre	Universités (chambre single)	Université Paul cezanne, Cinam-cnrs
PARRY	Guillaume	Universités (chambre single)	SIMAP
PENUELAS	José	Universités (chambre double)	Ecole Centrale de Lyon
PIZZAGALLI	Laurent	CNRS Chercheur	Laboratoire PHYMAT - CNRS - Université de Poitiers
PONCHET	Anne	Conférencier invité	CEMES CNRS

PROUDHON	Henry	Universités (chambre single)	MINES ParisTech
RABIER	Jacques	CNRS Chercheur	PHYMAT UMR6630
REBOH	Shay	CNRS Doctorant ou postdoc	Centre d'Elaboration de Matériaux et d'Etudes Structurales
RENAULT	Pierre-olivier	Universités (chambre single)	lab Phymat- umr 6630
RICHARD	Axel	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	CEA DEN\DEC\SESC\LLCC
RICHARD	Marie-Ingrid	Universités (chambre single)	Université Paul Cézanne Aix-Marseille III - IM2NP
RIVERO	Christian	Industriel et EPIC	STMicroelectronics
ROBACH	Odile	Conférencier invité	CEA
SAINT- GIRONS	Guillaume	Conférencier invité	INL-UMR5270
SCHENK	Thomas	CNRS Chercheur	Institut Jean Lamour - UMR 7198 - SI2M
THIBAUT- PENISSON	Jany	Conférencier invité	CNRS
THOMAS	Olivier	Universités (chambre single)	IM2NP UMR 6242
TIRANO	Sauveur	CNRS Doctorant ou postdoc	IM2NP - UMR CNRS 6242
VAYRETTE	Renaud	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	ENSM-SE/Centre de Microelectronique de Provence
VERDIER	Marc	Conférencier invité	CNRS
VU HOANG	Sinh	Hors CNRS Doctorant ou postdoc	SIMAP - INPG
WILLAIME	François	Conférencier invité	

Synthèse de l'évaluation par les participants à l'issue de la formation

Des **49 questionnaires** recueillis à la suite de l'Ecole, il ressort les points suivants :

1. Echanges entre participants (organisés et libres) et cohésion du groupe

La grande majorité des participants insistent sur la qualité des échanges qu'ils ont pu avoir durant l'Ecole. Plus précisément, ils les qualifient de :

- « Très satisfaisants » : 32 réponses (65 %)
- « Satisfaisants » : 16 réponses (33 %)
- « Peu satisfaisants » : 1 réponse (2 %)

Quelques commentaires positifs :

Ouverture d'esprit / convivialité / excellente ambiance / temps libre favorisant les échanges / durée et fréquence des pauses bien adaptées aux échanges / interventions très animées / disponibilité des intervenants / facilité de discussion / richesse de la présence de mécaniciens + physiciens / experts / interdisciplinarité très profitable / les questions de fond ont été largement débattues / échanges instructifs, pédagogiques et exigeants

Quelques remarques négatives :

Discussions trop poussées, non compréhensibles pour des thésards / programme trop dense / la conférence a plutôt tourné à un débat d'experts, loin de l'esprit « école » / école nécessitant des pré-requis importants, difficile d'accès.

2. Attentes

Les participants ont déclaré que leur attente principale (item classé en 1er) était :

- Une mise à jour et/ou un approfondissement de leur connaissance dans leur domaine de recherche : 18 réponses (37.5 %)
- L'apport d'information sur un thème proche de leurs propres recherches : 18 réponses (37.5 %)
- L'acquisition des concepts de base dans un domaine nouveau : 9 réponses (17 %)
- Une synthèse des travaux de recherche actuels : 3 réponses (6 %)
- Une rencontre avec des spécialistes : 1 réponse (2 %)

3. Satisfaction des attentes

Face à ces attentes, la plupart des participants sont satisfaits (39 réponses, 80%), ou tout au moins en partie satisfaits (4 réponses) ; 3 personnes se déclarent insatisfaites, 3 ont omis de répondre.

4. Points forts	vs	Points faibles
<ul style="list-style-type: none"> - Qualité scientifique et pédagogique des animateurs (20) / spécialistes (2) / excellence (5) / rappel des fondamentaux à chaque introduction (3) - les intervenants ont bien joué le jeu « Ecole » - Qualité du programme / intérêt des cours et des sujets (10) Variété des sujets traités (3) / pluridisciplinarité (11) / un + pour les dislocations et la plasticité - Qualité des TD (2) / Adéquation théorie – expérience (2) - Intérêt des échanges (7) / ambiance favorisant les échanges (3) / facilité du dialogue / convivialité (4) / temps pour les discussions / échanges fructueux / rencontres de spécialistes / mixité étudiants-chercheurs - Qualité de l'organisation (4) - Qualité du séjour : Cadre très agréable (5) / très confortable 		<ul style="list-style-type: none"> - Cours trop denses (4) / Durée des cours souvent trop courte par rapport au message très riche que les professeurs voulaient faire passer/ quelques cours un peu difficiles pour les doctorants / pédagogie à améliorer / Journée du jeudi trop chargée (3) / Dépassement des temps de parole / longueur des exposés / certains thèmes étaient trop éloignés de mes préoccupations - TD difficiles à suivre / progrès à faire sur les TD (2) / trop éloignés de mon activité / trop courts / trop peu de TD / TD pas assez « dirigés » - Aspect « école » un peu en retrait (interventions parfois de type « colloque ») / Discussions d'experts / interventions trop spécialisées (3) / temps de discussion un peu court - Programme : trop dense (3) / peu de séminaires courts / nombre de séminaires trop restreint / regroupement trop fort des cours par discipline / Plasticité peu abordée / pas d'exemple de dislocations de misfit avant la fin de l'école / mauvais cours MET / cours NEMS : erreur de casting ou erreur de public ☺ / croissance et génération des contraintes dans les polycristaux non traitées / matériaux amorphes non traités / nanofils non traités / tous les transparents disponibles n'ont pas toujours pu être commentés - Supports : Toutes les présentations n'étaient pas sur le site (2) / pas de support papier - Séjour : repas trop copieux / fermeture du bar trop précoce / présence de colonies d'enfants bruyants / connexion internet difficile

5. Bénéfices de l'Ecole

A l'issue de l'Ecole, les participants ont déclaré (en choix multiples) :

« avoir élargi ma culture scientifique dans mon champ thématique »	39 réponses
« avoir élargi ma culture scientifique en dehors de mon champ thématique »	46 réponses
« avoir confronté mes idées avec celles de collègues de culture scient. différente »	40 réponses
« avoir trouvé un langage commun »	32 réponses
« pouvoir aborder mes problématiques habituelles sous un angle nouveau »	28 réponses

6. Retombées attendues dans le cadre du projet professionnel

Grâce à leur participation à l'Ecole, ils attendent principalement (item classé en 1^{ère} position) :

« une consolidation de mes recherches actuelles »	30 réponses
« l'établissement de nouvelles collaborations en dehors de mon champ »	8 réponses
« une meilleure intégration dans la communauté scientifique »	6 réponses
« une réorientation thématique »	2 réponses
« autre » (amélioration de mes compétences)	2 réponses
	1 non réponse

7. Suggestions d'amélioration en cas de reconduction de l'Ecole

• Sur le fond du programme :

- alterner les interventions « plasticité » et « croissance/plasticité » plutôt que les faire se succéder (4)
- garder le cap « nano » ou du moins « petite taille »
- plus centrer sur la mécanique
- plus de théorie sur la mécanique dynamique (et non statique) des nano-objets (NEMS, MEMS)
- faire deux parties : une encore plus basique et pédagogique ; l'autre plus pointue et actuelle sur les recherches en cours
- espacer les temps de cours ; les faire plus courts (3) ; écourter l'école ou faire moins d'interventions en une journée (2)
- allonger la durée des présentations ; augmenter le nombre de séminaires
- ré-équilibrer quelque peu le rapport cours/TD
- faire une table ronde à la fin de chaque journée ; faire plus de tables rondes
- prévoir plus de contributions industrielles,
- augmenter le nombre de TD (10) ; améliorer les TD (plus longs, plus faciles, plus participatifs)
- attribuer plus de temps aux posters ; présentation orale rapide de chaque poster en session
- prévoir des temps de discussions réservés aux personnes débutantes ou non spécialistes
- élargir les intervenants à l'international
- avoir des cours de base au début de l'école (2) ; allonger la durée des cours fondamentaux
- prévoir un après-midi complet de « loisir » pendant le séjour

- **Propositions de thèmes à traiter :**

- bases pratiques de diffraction
- matériaux amorphes et polymères
- croissance des nano-objets par voie vapeur ou par voie chimique
- croissance, diffusion (2), génération des contraintes
- micromécanique dans les technologies d'assemblage (assemblages hétérogènes type adhérence moléculaire, flip chip, etc...)
- matériaux thermo et piezo électriques
- futurs challenges en science des matériaux
- mécanismes de déformation à petites échelles dans les matériaux non cristallins
- élasticité / plasticité dans les nano-objets polymères
- élasticité / plasticité de nano-objets sur substrats verriers
- essais nanomécaniques
- nano-alliages (métalliques) épitaxiés, influence des contraintes sur les transitions ordre/désordre, etc...
- vieillissement / durabilité des nano-objets
- MEMS et NEMS à approfondir
- détermination des densités et arrangements des dislocations à partir de l'étalement des pics de Bragg en analyse RX
- comment faire une bonne modélisation ? comment développer une loi de comportement ?
- méthodes d'élaboration des matériaux en relation avec leurs propriétés mécaniques ultérieures ; un peu plus sur l'élaboration des nano-objets
- le cours d'Helena Van Z. a vraiment manqué
- analogie mécanique cellulaire / mécanique classique (moteurs biologiques/moteurs macroscopiques)

- **Sur la pédagogie :**

Définir clairement les sigles et acronymes, utiliser une notation uniforme des variables

- **Sur les moyens matériels :**

Manque de supports papier (5) (*)

(*) Le comité d'organisation de l'Ecole avait choisi de déposer les supports de cours sur un site ftp accessible à tous les participants avant la tenue de l'Ecole afin que ceux-ci puissent éventuellement les imprimer avant leur départ. Etait par ailleurs disponible dans la pochette distribuée à tous à l'accueil de l'Ecole une clef usb qui contenait ces mêmes supports au format pdf. Visiblement, cette initiative a été soit mal comprise, soit mal perçue...

- **Sur l'organisation :**

- Communiquer les pré-requis avant l'Ecole
- Changer le titre en « mécanique à l'échelle nanoscopique »
- Informer plus explicitement sur le contenu de l'école (titre trompeur)

8 . Evaluation globale

- Quelques commentaires positifs :

« Excellente école, à tous points de vue / école très bien organisée, scientifiquement complète / qualité des présentations scientifiques / très bonne école, à la fois très instructive et très agréable / table ronde géniale / table ronde superbe / école très riche, très conviviale / très positif / très profitable / excellent / très bon niveau des discussions scientifiques / très agréable, scientifiquement et socialement / très bonne école avec un bon équilibre / excellente organisation / super cadre et très bon rythme entre cours et discussions / bravo aux organisateurs / organisation parfaite / les intervenants ont fait l'effort de faire de « vrais » cours / la quasi-totalité des cours étaient au niveau où on les attendait »

- Un commentaire négatif :

« l'Ecole ressemble trop à un congrès d'experts »

- **Analyse de l'appréciation selon les critères proposés**

	Très satisfaisant	Satisfaisant	Insuffisant	Très insuffisant	aucune réponse
<i>Interdisciplinarité</i>	20	25	4		
<i>Traitement des thématiques</i>	18	28	2		1
<i>Intérêt pour votre projet de recherche</i>	18	21	8	1	1
<i>Durée des interventions</i>	22	22	4	1	
<i>Durée de l'école</i>	29	13	6		1
<i>Organisation matérielle</i>	42	6	1		
<i>Approche pédagogique</i>	17	24	6	1	1
<i>Supports pédagogiques</i>	16	25	8		

Budget

Le budget ci-dessous est une photographie au 06 septembre 2010. Il est susceptible d'évolution car toutes les subventions n'ont pas encore été recouvrées par le service comptable de la DR12.

Recettes					Dépenses			montant réel payé	
Subvention CNRS	22400,00	HT	22400,00	HT	Les Escandilles	43101,00	TTC	40774,91	HT
Inscriptions	27900,00	TTC	23327,76	HT	Locations PC	2152,80	TTC	1800,00	HT
GdR Mecano	3000,00	TTC	2508,36	HT	Communication	2291,69	TTC	1916,13	HT
CEA (INAC)	500,00	TTC	418,06	HT	Missions	1500,59	TTC	1500,59	TTC
St Gobain	1000,00	TTC	836,12	HT	Bus	678,00	TTC	678,00	TTC
ST	1000,00	TTC	836,12	HT	Editions	4500,00	TTC	4265,40	HT
Cnano GE	1000,00	TTC	836,12	HT					
Total recettes	56800,00	TTC	51162,54	HT	Total dépenses	54224,08	TTC	50935,03	MIXTE

Conclusion

L'école MECANO a été un vrai succès. Elle a permis de rassembler 87 chercheurs d'horizons différents (physiciens, mécaniciens, chimistes) autour de la mécanique aux petites échelles. La forte proportion (31%) de doctorants et postdoctorants est à noter et correspond bien aux objectifs que nous nous étions fixés. Le caractère pluridisciplinaire marqué de cette école a été apprécié par les participants même si les difficultés inhérentes à l'existence de cultures scientifiques différentes ont bien été ressenties.

Le dépouillement des questionnaires ainsi que les discussions que nous avons pu avoir pendant et après l'école indiquent une vraie demande pour une future école rassemblant à nouveau physiciens, chimistes et mécaniciens.

Au-delà des participants l'école assure une diffusion des connaissances plus vaste à travers :

- Le site web sur lequel on peut trouver les fichiers de la plupart des cours :
<http://www.im2np.fr/GDR-Mecano/ecolenano-objets2010/>
- Un ouvrage « Mechanics of Nano-objects » en cours de publication aux presses de l'Ecole des Mines de Paris.

Publications 2008-2010 des laboratoires du GDR MECANO

2008

Hirel P., Godet J., Brochard S., Pizzagalli L., Beauchamp P., Determination of activation parameters for dislocation formation from a surface in fcc metals by atomistic simulations, *Physical Review B*, 78, 6 (2008) 064109

P.-M. Chassaing, F. Demangeot, V. Paillard, A. Zwick, N. Combe, C. Pagès, M. L. Kahn, A. Maisonnat, B. Chaudret, Surface optical phonons as a probe of organic ligands on ZnO nanoparticles: An investigation using a dielectric continuum model and Raman spectrometry, *Phys. Rev. B* 77,153306 (2008)

Rohart, S.; Girard, Y.; Nahas, Y.; Repain, V.; Rodary, G.; Tejada, A. & Rousset, S. , Growth of iron on gold vicinal surface: from nanodots to step flow, *Surface Science*, **602**, (2008) 28-36.

Leroy, F.; Renaud, G.; Letoublon, A.; Rohart, S.; Girard, Y.; Repain, V.; Rousset, S.; Coati, A. & Garreau, Y. Kink ordering and organized growth of Co clusters on a stepped Au(111) surface: A combined GISAXS, GIXD and STM study, *Physical Review B*, **77**, (2008) 045430.

Maurice C., Fortunier R., A 3D Hough transform for indexing EBSD and Kossel patterns *Journal of Microscopy* **230**, Pt 3 2008, pp 520-529 (2008)

Kasbari M., Delamare R., Blayac S., Rivero C., Fortunier R., Embedded stress sensors for strained technologies process control, *IEEE Transactions on Semiconductor manufacturing* **21** (3), pp 352-357 (2008)

Tanguy D., Razafindrazaka M., Delafosse D., Multiscale simulation of crack tip shielding by a dislocation *Acta Mater.* **56** (2008) 2441–2449

M. Eberlein, S. Escoubas, M. Gailhanou, O. Thomas, P. Rohr, and R. Coppard, Influence of crystallographic orientation on local strains in silicon: a combined high resolution X-ray diffraction and finite element modeling investigation, *Thin Solid Films* **516**, 8042 (2008).

S. Escoubas, H. Brillet, T. Mesarotti, G. Raymond, O. Thomas and P. Morin, Local strains induced in Si channel by a periodic array of nitride capped poly lines investigated by high resolution X-ray diffraction ,*Mat. Sc. and Engi. B* **154-155**, 129 (2008)

A. Minkevich , T. Baumbach, M. Gailhanou, O. Thomas, Applicability of an iterative inversion algorithm to the diffraction pattern from inhomogeneously strained crystals, *Phys. Rev. B* **78**, 174110 (2008).

O. Thomas, Diffraction analysis of elastic strains in micro and nano-structures, *Z. Kristallogr.* **223**, 569 (2008).

B. Kaouache, S. Labat, O. Thomas, S. Maitrejean, V. Carreau, Texture and strain in narrow copper damascene interconnect lines: an x-ray diffraction analysis, *Microelectronic Engineering*, **85**, 2175 (2008).

Aqua JN., Frisch T., Elastic interactions and kinetics during reversible submonolayer growth: Monte Carlo simulations, *Physical Review B* **78**, 12, (2008) 121305

P.Müller, Crystal growth and elasticity, *Eur Physical Journal Applied Physics* 43 (2008) 271.

B. Girault, V. Vidal, L. Thilly, P.-O. Renault, P. Goudeau, E. Le Bourhis, P. Villain-Valat, G. Geandier, J. Tranchant, J.-P. Landesman, P.-Y. Tessier, B. Angleraud, M.-P. Besland, A. Djouadi, F. Lecouturier Small scale mechanical properties of polycrystalline materials: in situ diffraction studies *Int. J. Nanotechnol.*, 5 (2008), 609

S. Reboh, M. F. Beaufort, J. F. Barbot, J. Grilhé and P. F. P. Fichtner, Orientation of H platelets under local stress in Si, *Applied Physics Letters* 93, 022106 2008

G. Kermouche, E. Barthel, D. Vandembroucq and P. Dubujet, Mechanical modelling of indentation induced densification of silica, *Acta Materialia* 56 (2008) 3222-3228.

Nicolas Chemin, Laurence Rozes, Corinne Chanéac, Sophie Cassaignon, Eric Le Bourhis, Jean-Pierre Jolivet, Olivier Spalla, Etienne Barthel and Clément Sanchez, Structure and Mechanical Properties of Mesostructured Functional Hybrid Coatings Based on Anisotropic Nanoparticles Dispersed on Poly(hydroxyethyl methacrylate), *Chem. Mater.*, 20 (2008) 4602–4611.

Vandembroucq D., Deschamps T., Coussa C., Perriot A., Barthel E., Champagnon B., Martinet C., Density hardening plasticity and mechanical aging of silica glass under pressure: A Raman spectroscopic study, *J. Phys.: Condens. Matter* **20** (2008) 485221

Houdellier F, Altibelli A, Roucau C, Casanove MJ. New approach for the dynamical simulation of CBED patterns in heavily strained specimens, *Ultramicroscopy* 2008;108:426.

Houdellier F, Jacob D, Casanove MJ, Roucau C. Effect of sample bending on diffracted intensities observed in CBED patterns of plan view strained samples, *Ultramicroscopy* 2008;108:295.

2009

N. Combe, P.-M. Chassaing, F. Demangeot, Surface effects in Zinc Oxyde nanoparticles, *Phys. Rev. B* 79, 045408 (2009)

N. Combe, J.R. Huntzinger, J. Morillo, Surface loving and avoiding modes, *Europhys. B*, 68, 47 (2009)

P.-M. Chassaing, F. Demangeot, N. Combe, L. Saint-Macary, M.L. Kahn, B. Chaudret, Raman scattering by acoustic phonons in wurtzite ZnO prismatic nanoparticles, *Phys. Rev B.*, 79,155314 (2009)

- N. Combe, L. Saviot, Acoustic modes in metallic nanoparticles: atomistic versus elasticity modelling, *Phys. Rev. B* **80**, 035411 (2009)
- Godet J., Hirel P., Brochard S., Pizzagalli L., Evidence of two plastic regimes controlled by dislocation nucleation in silicon nanostructures, *Journal of Applied Physics*, **105**, 2 (2009) 026104
- Godet J., Hirel P., Brochard S., Pizzagalli L., Dislocation nucleation from surface step in silicon: the glide set versus the shuffle set, *Physica Status Solidi A*, **206**, 8 (2009) 1885
- Pizzagalli L., Godet J., Brochard S., Glissile dislocations with transient cores in silicon, *Physical Review Letters*, **103**, 6 (2009) 065505
- Nahas, Y.; Repain, V.; Chacon, C.; Girard, Y.; Lagoute, J.; Rodary, G.; Klein, J.; Rousset, S.; Bulou, H. & Goyhenex, C. , Dominant Role of the Epitaxial Strain in the Magnetism of Core-Shell Co/Au Self-Organized Nanodots, *Physical Review Letters*, **103**, (2009) 067202.
- Lysenko V., D. Ostapenko D., Bluet J.M., Regren Ph., Mermoux M., Marty O., Boucherif A., Grenet G., Skryshevsky V., G. Guillot G.
Straining of thin Si films by partially oxidized meso-porous Si substrates”
Physica Status Solidi (a): Applications and Materials Science **206** (2009) 1255-1258.
- Magoriec H., Danescu A., Modelling Macroscopic Elasticity of Porous Silicon. , *Physica. Status Solidi C* **7**, 6(2009)1680-1684,
- Magoriec H., Danescu A., Macroscopic elasticity of nanoporous silicon: bulk and surface effects, IUTAM Bookseries, Volume 17, Ed. P. STEINMANN, 139-148, 2009
- Villert S., Maurice C., Wyon C., R. Fortunier R., Accuracy assessment of elastic strain measurement by EBSD, *Journal of Microscopy* **233** (2), pp 290-301 (2009)
- Fendler M., Davoine C., Marion F., Saint-Patrice D., Fortunier R., Ribot H., A fluxless and low temperature flip chip process based on insertion technique, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* **32** (1), pp 207-215 (2009)
- Vamvakopoulos E., Tanguy D., Equilibrium vacancy concentrations in Al-S=33(554)[110] by Grand Canonical Monte Carlo Simulations, *Phys. Rev. B* **79** (2009) art. 094116
- J-M. Roussel, S. Labat, O. Thomas, Relation between strain and composition in coherent epitaxial Cu/Ni multilayers: influence of strong concentration gradients, *Phys. Rev. B* **79**, 014111 (2009).
- D. Connétable, O. Thomas, First principles calculations of the elastic constants of NiSi, *Phys. Rev. B* **79**, 094101 (2009).

- Monnet G., C. Domain, S. Queyreau, S. Naamane, and B. Devincre., Atomic and dislocation dynamics simulations of plastic deformation in reactor pressure vessel steel., *Journal of Nuclear Materials*, 394(2-3):174–181, 11 2009.
- Queyreau S., G. Monnet, and B. Devincre., Slip systems interactions in [alpha]-iron determined by dislocation dynamics simulations., *International Journal of Plasticity*, 25(2):361–377, 2009.
- Queyreau S. and B. Devincre.
Bauschinger effect in precipitation-strengthened materials: A dislocation dynamics investigation. *Philosophical Magazine Letters*, 89(7):419–430, 2009.
- Kubin L., T. Hoc, and B. Devincre., Dynamic recovery and its orientation dependence in face-centered cubic crystals., *Acta Materialia*, 57(8):2567–2575, 2009.
- J. Colin, J. Grilhé, P. Müller, Nanostructure instability induced by anisotropic epitaxial stresses *Physical Review E* 80 (2009) 052601
- D. Karashanova, J.J. Métois, F. Leroy, P. Müller Is it possible to use external stress to tune silicon surface morphology ?, *Materials Science in semiconductor processing* 12 (2009) 12
- Geandier G., L. Gélébart, O. Castelnau, E. Le Bourhis, P.-O. Renault, Ph. Goudeau, D. Thiaudière, Micromechanical modeling of the Elastic Behavior of Multilayer Thin Films; Comparison with in situ data from X-Ray Diffraction. *IUTAM Symp. on Modelling Nanomaterials and Nanosystems, IUTAM Book Series* (Springer), Eds. R. Pyrz, J.C. Rauhe, p.99-108, 2009.
- Faurie D., O. Castelnau, R. Brenner, P.O. Renault, E. Le Bourhis, P. Goudeau, In situ diffraction strain analysis of elastically deformed polycrystalline thin films, and micromechanical interpretation, *J. Appl. Cryst.*, **42**, p.1073-1084, 2009
- V. Vidal, L. Thilly, S. Van Petegem, U. Stuhr, F. Lecouturier, P.O. Renault, H. Van Swygenhoven, Plasticity of nanostructured Cu-Nb-based wires: strengthening mechanisms revealed by in-situ deformation under neutrons *Scripta Materialia*, 60 (2009), 171
- L. Thilly, S. Van Petegem, P.O. Renault, F. Lecouturier, V. Vidal, B. Schmitt, H. Van Swygenhoven, A new criterion for the elasto-plastic transition in nanomaterials: application to size and composite effects on Cu-Nb nanocomposite wires *Acta Materialia*, 57 (2009), 3157
- S. Reboh, A. A. de Mattos, J. F. Barbot, A. Declémy, M. F. Beaufort, R. M. Papaléo, C. P. Bergmann and P. F. P. Fichtner, Localized exfoliation versus delamination in H and He coimplanted (001) Si, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 105, 093528 2009
- D. Dalmas, E. Barthel and D. Vandembroucq, Crack front pinning by design in heterogeneous interfaces, *JMPS*, 57 (2009), 446-457

2010

W. Lu, T. Rohel, N. Bertru, H Folliot, C. Paranthoen, J. M. Jancu, A. Letoublon, A. Le Corre, C. Gatel, A. Ponchet, N. Combe, J. M. Ulloa, P. Koenraad, Achievement of InSb Quantum Dots on InP(100) Substrates, *Jap. J. Appl. Phys.*, 49, 060210 (2010)

MJ. Casanove, N. Combe, F. Houdelier, M.J. Hytch, Ge-Si chemical contrast in spherical-aberration-corrected HRTEM images Visualising alloy fluctuations, *EuroPhys. Lett.*, 91, 36001 (2010)

Prevot, G.; Girard, Y.; Repain, V.; Rousset, S.; Coati, A.; Garreau, Y.; Paul, J.; Mammen, N. & Narasimhan, S. ,Elastic displacements and step interactions on metallic surfaces: Grazing-incidence x-ray diffraction and ab initio study of Au(332), *Physical Review B*, **81**, (2010) 075415.

Mehendale S. , Girard Y. , Repain V. , Chacon C. , Lagoute J. , Rousset S. , Marathe M. , Narasimhan S. Ordered Surface Alloy of Bulk-Immiscible Components Stabilized by Magnetism *Physical Review Letters*, **105**, (2010) 056101 .

Boucherif A., Blanchard N.P, Regreny Ph, Marty O, Guillot G., Grenet G., Lysenko V., Tensile strain engineering of Si thin films using porous Si substrate, *Thin Solid Films* 518,9 (2010) 2466-2469

Blanchard N.P., Boucherif A., Regreny Ph., Danescu A., Magoariec H., Penuelas J., Lysenko V., Bluet J-M., Marty O., Guillot G. , G. Grenet G., Engineering pseudosubstrates with porous silicon technology "Semiconductor-On-Insulator Materials for NanoElectronics Applications" (2010) edited by Springer

Diop M., Mandrillon V., Boutry H., Inal K., Fortunier R., Analysis of nickel cylindrical bump insertion into aluminium thin film for flip chip applications, *Microelectronic Engineering* **87**, pp 522-526 (2010)

Villanova J., Sicardy O., Fortunier R., Micha J.S., Bleuet P., Determination of global and local residual stresses in SOFC by X-ray diffraction, *Nuclear instrument & Methods in physics research B : interactions with materials and atoms* **268** (3-4), pp282-286 (2010)

Maurice C., Fortunier R., Driver J.H., Day A., Mingard K., Meaden G., Comment on the paper "Bragg's law diffraction simulations for electron backscatter diffraction analysis" by J. Kacher, C. Landon, B. L. Adams and D. Fullwood, *Ultramicroscopy* **110**, pp 758-759 (2010)

Britton T.B., Maurice C., Fortunier R., Driver J.H., Day A.P., Meaden G., Dingley D.J., Mingard K., Wilkinson A., Factors affecting the accuracy of high resolution electron backscatter diffraction when using simulated patterns, *Ultramicroscopy*, in press (2010)

Fillit R.Y., Fortunier R., Stress and thermal characterization in "Advanced MEMS-RF", chapter 7, edited by S. Lucyszyn, ISBN 978-0-521-89771-6, Cambridge University Press (2010)

A. Vodnick, D. Nowak, S. Labat, O. Thomas, S. Baker, Out-of-plane stresses arising from grain interactions in textured thin films, *Acta Mat.* **58**, 2452 (2010).

H. Proudhon, N. Vaxelaire, S. Labat, S. Forest, O. Thomas, Finite element simulations of coherent diffraction in elastoplastic polycrystalline aggregates, *C.R. Physique* **11**, 293 (2010).

N. Vaxelaire, S. Labat, V. Chamard, O. Thomas, V. Jacques, F. Picca, S. Ravy, C. Kirchlechner, J. Keckes, 3D strain imaging in sub-micrometer crystals using cross-reciprocal space measurements : numerical feasibility and experimental methodology, *Nuclear Instruments and Methods B* **268**, 388 (2010).

N. Vaxelaire, H. Proudhon, S. Labat, C. Kirchlechner, J. Keckes, V. Jacques, S. Ravy, S. Forest, O. Thomas, Methodology for studying strain inhomogeneities in polycrystalline thin films during in situ thermal loading using coherent x-ray diffraction, *New Journal of Physics* **12**, 035018 (2010).

C. Kirchlechner, D. Kiener, C. Motz, S. Labat, N. Vaxelaire, O. Perroud, JS. Micha, O. Ulrich, O. Thomas, G. Dehm, J. Keckes, Dislocation storage in single slip-oriented Cu micro-tensile samples: new insights via X-ray microdiffraction, *Phil. Mag.* (2010).

D. Connétable, O. Thomas, Lattice instabilities in hexagonal NiSi:NiAs prototype structure, *Phys. Rev. B* **81**, 075213 (2010).

O. Perroud, R. Vayrette, C. Rivero, O. Thomas, JS. Micha, O. Ulrich, X-ray microbeam strain investigation on Cu MEMS structures, *Microelectronic Engineering*, **87**, 394 (2010).

Queyreau S., G. Monnet, and B. Devincré., Orowan strengthening and forest hardening superposition examined by dislocation dynamics simulations., *Acta Materialia*, 58(17):5586–5595, 10 2010.

Devincré B. and L. Kubin., Scale transitions in crystal plasticity by dislocation dynamics simulations. *Comptes Rendus Physique*, in press, 2010.

de Sansal C., B. Devincré, and L. Kubin., Grain size strengthening in microcrystalline copper: A three-dimensional dislocation dynamics simulation., In *Mechanical Properties of Solids XI*, volume 423 of *Key Engineering Materials*, pages 25–32. Trans Tech Publications, 2010.

Vatré A., B. Devincré, A. Roos, and F. Feyel., Predicting size effects in nickel-base single crystal superalloys with the discrete-continuous model., *European Journal of Computational Mechanics*, 19:65– 76, 2010.

Vatré A., B. Devincré, and A. Roos., Orientation dependence of plastic deformation in nickel-based single crystal superalloys: Discrete-continuous model simulations., *Acta Materialia*, 58(6):1938–1951, 4 2010.

Naamane S., G. Monnet, and B. Devincré., Low temperature deformation in iron studied with dislocation dynamics simulations., *International Journal of Plasticity*, 26(1):84–92, 1 2010.

Aqua JN., Frisch T., Influence of surface energy anisotropy on the dynamics of quantum dot growth, *Physical Review B*, **82**, 8, (2010) 085322

Aqua JN., Frisch T., Verga A., Ordering of strained islands during surface growth, *Physical Review E*, 81, 2, (2010) 021605

Gîrleanu M., Pac M.-J., Ersen O., Werckmann J., Arnold G., Rousselot C., Tuilier M.-H. , The role of structural properties on damage behaviour of titanium and aluminium nitride coatings: an EXAFS and MET study. , *Surface and Coatings Technology*, 204, 12-13 (2010) 2042-2045.

Olives J., Surface thermodynamics, surface stress, equations at surfaces and triple lines for deformable bodies., *Journal of Physics: Condensed Matter*, **22** (2010) 085005

Olives J., Reply to comment on 'Surface thermodynamics and surface stress for deformable bodies'. *Journal of Physics: Condensed Matter*, **22** (2010) 428002

G. Geandier, P.-O. Renault, E. Le Bourhis, Ph. Goudeau, D. Faurie, C. Le Bourlot, Ph. Djémia, O. Castelnaud, and S. M. Chérif, Elastic-strain distribution in metallic film-polymer substrate composites, *Applied Phys. Lett.*, **96**, 041905, 2010.

J.B. Dubois, L. Thilly, P.O. Renault, F. Lecouturier, M. Di Michiel Thermal stability of nanocomposite metals: in-situ observation of anomalous residual stresses relaxation during annealing under synchrotron radiation *Acta Materialia*, 58 (2010), 6504

Brochard S., Hirel P., Pizzagalli L., Godet J., Elastic limit for surface step dislocation nucleation in face-centered cubic metals: Temperature and step height dependence, *Acta Materialia*, 58, 12 (2010) 4182

Hirel P., Godet J., Brochard S., Pizzagalli L., Beauchamp P., Erratum: Determination of activation parameters for dislocation formation from a surface in fcc metals by atomistic simulations, *Physical Review B*, 81, 5 (2010) 059901

S. Reboh, F. Schaurich, A. Declémy, J. F. Barbot, M. F. Beaufort, N. Cherkashin and P. F. P. Fichtner, On the microstructure of Si coimplanted with H⁺ and He⁺ ions at moderate energies, *J. Appl. Phys.* 108, 023502 (2010)

Martin Hytch, Nikolay Cherkashin, Shay Reboh, Florent Houdellier and Alain Claverie, Strain mapping in layers and devices by electron holography, accepted, *physica status solidi* (2010)

F. Conchon, P.-O. Renault, P. Goudeau; E. Le Bourhis, E. Sondergard, E. Barthel, S. Grachev, E. Gouardes, V. Rondeau, R. Gy, R. Lazzari, J. Jupille, N. Brun, X-ray diffraction analysis of thermally-induced stress relaxation in ZnO films deposited by magnetron sputtering on (100) Si substrates, *Thin Solid Films* (2010)

S. Y. Grachev, A. Mehlich, J.-D. Kamminga, E. Barthel and E. Sondergard, High-throughput optimization of adhesion in multilayers by superlayer gradients, *Thin Solid Films* 518 (2010) 6052 – 6054

X. Geng, Z. Zhang, E. Barthel, D. Dalmas, Mechanical behavior of stiff coating on glass under sliding contact, *Wear* 269 (2010) 351-361

Conchon Florine, Renault Pierre-Olivier, Goudeau Philippe, Le Bourhis Eric, Sondergard Elin, Barthel Etienne, Grachev Sergey, Gouardes, Eric, Rondeau Veronique, Gy René, Lazzari Remi, Jupille Jacques, Brun Nathalie, Residual Stresses in Sputtered ZnO Films on (100) Si Substrates by XRD, MRS Proc. Vol. 1201 Fall Meeting 2009 (2010) paper 1201-H05-03

F. Conchon, P.-O. Renault, E. Le Bourhis, C. Krauss, P. Goudeau, E. Barthel, S. Grachev, E. Sondergard, V. Rondeau, R. Gy, R. Lazzari, J. Jupille, N. Brun, X-ray diffraction study of thermal stress relaxation in ZnO films deposited by magnetron sputtering, Thin Solid Films (2010) in press

Gatel C, Tang H, Crestou C, Ponchet A, Bertru N, Doré F, Folliot H., Analysis by high-resolution electron microscopy of elastic strain in thick InAs layers embedded in Ga_{0.47}In_{0.53}As buffers on InP(0 0 1) substrate, Acta Materialia 2010;58:3238.

Thèses 2008-2010

Eberlein M.

Contraintes locales induites par le procédé « Shallow trench Isolation » : Diffraction X haute résolution et simulations par éléments finis

Thèse de Docteur de Université Paul Cézanne (Aix-Marseille III) (24 janvier 2008)

Kasbari M.

Intégration de capteurs pour le suivi des contraintes mécaniques sur une ligne de production microélectronique

Thèse de Docteur de l'École des Mines de Saint-Étienne (16 Juin 2008)

Hirel P.

Etude par simulations à l'échelle atomique de la formation de boucles de dislocation à partir d'irrégularités de surface d'un métal contraint.

Thèse de Docteur de l'Université de Poitiers (12 novembre 2008)

Villert S.

Analyse des déformations élastiques locales par la technique EBSD

Thèse de Docteur de l'École des Mines de Saint-Étienne (28 Octobre 2008)

Geng X.

Failure Mechanisms of Weak Adhesion Optical Coatings Under Sliding Contact

Thèse de Docteur de l'Université Pierre et Marie Curie (20 Novembre 2008)

Chassaing P.M.

Quelques illustrations du rôle de la surface dans des nanoparticules de ZnO

Thèse de Docteur de l'Université Paul Sabatier Toulouse III (3 juillet 2009)

Nahas Y.

Nanostructures magnétiques auto-organisées

Thèse de Docteur de l'Université Paris Diderot-Paris 7 (Avril 2009)

Diop M.

Contribution à l'étude mécanique et électrique du contact localisé : Adaptation de la nanoindentation à la micro-insertion

Thèse de Docteur de l'École des Mines de Saint-Étienne (9 Mars 2009)

Benoudia M-C.

Interdiffusion et déformations dans des multicouches Mo/V et Cu/Ni : diffraction des rayons X et simulation de la cinétique

Thèse de Docteur de l'Université Paul Cézanne (Aix-Marseille III) (1 juillet 2009)

Raïssi M.

Hétérostructures quantiques à contrainte compensée Si_{1-x}Ge_x/Si(001) pour application à la photo-détection infrarouge.

Thèse de Docteur de l'Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II (15 décembre 2009)

Boucherif Abderraouf

Elaboration de pseudosubstrats accordables en paramètre de maille à base de Silicium mésoporeux pour l'hétéroépitaxie

Thèse de Docteur de l'Université Lyon 1- Institut des Sciences Appliquées de Lyon (15 octobre 2010)

Gîrleanu M.

Etude de la structure de films minces de nitrures de titane et d'aluminium Ti_{1-x}Al_x ($0 \leq x \leq 1$) et de son rôle sur l'indentation.

Thèse de Docteur de l'Université de Haute Alsace, Mulhouse (9 septembre 2010).

Dubois J.B.

Conducteurs nanocomposites élaborés par déformation plastique sévère : effet de la nanostructuration sur la microstructure et les mécanismes de déformation

Thèse de Docteur de l'Université de Poitiers (soutenance prévue le 13 ou 14 décembre 2010)

Habilitations à Diriger des Recherches:

Thilly L.

Plasticité des matériaux : du monocristal au nanocristal. Une étude de transitions mécaniques Université de Poitier (07/12/2009)

Legros M.

Plasticité et confinement des dislocations
Université de Toulouse (avril 2010)