

## **Poste M.C.F. N° 0087 (4188)**

### **Corps : Maître de Conférences**

**Article de référence : 26 – 1 – 1**

**Arrêté du 13 février 2015 relatif aux modalités générales des opérations de mutation, de détachement et de recrutement par concours des maîtres de conférences** NOR : **MENH1503250A**

**Sections : 60<sup>ème</sup>**

**Profil : Modélisation multi-échelles en mécanique des matériaux multiphasés (composites et/ou alliages à mémoire de forme)**

**Job profile (Anglais): Multiscale modelling in mechanics of multiphase materials (composites and/or Shape Memory Alloys)**

### **Localisation :**

**Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - Campus de Metz**  
**4 rue Augustin Fresnel 57078 METZ CEDEX 3**

**Etat du poste : vacant**

### **Adresse d'envoi du dossier**

**Uniquement sous forme électronique à : <https://dematec-antee.ensam.eu>**

Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers – ARTS ET METIERS PARISTECH  
Direction Générale  
Service de Gestion Administrative des Ressources Humaines  
A l'attention de Madame Christine SAUSSEREAU  
151, Boulevard de l'Hôpital - 75 013 PARIS

### **Contact administratif**

Madame Magali PICOT, Service de Gestion Administrative des Ressources Humaines  
Tél. : 01.44.24.64.03  
Fax : 01.44.24.63.26  
E-mail : [magali.picot@ensam.eu](mailto:magali.picot@ensam.eu)

### **Profil enseignement**

Le Maître de Conférences (MCF) recruté permettra de consolider le spectre actuel des enseignements en mécanique du solide et en science des matériaux au sein du campus Arts et Métiers de Metz. Le candidat recruté assurera une partie de ses enseignements dans le cadre des UEI « Concevoir » en génie mécanique et en génie industriel de première et de deuxième année. Il assurera également des travaux dirigés en enseignement fondamental de la mécanique du solide (UEF-MDSI) et/ou en science des matériaux avancés (MATA), ainsi que des travaux pratiques en simulation numérique par la méthode des éléments finis au moyen du code de calcul ABAQUS. Il participera, à hauteur de 30% de son service statutaire, à des encadrements de projets d'élèves-ingénieurs en première et en deuxième année notamment dans le cadre du cursus Franco-allemand et enfin des projets d'élèves en troisième année du cursus de formation d'ingénieur Arts et Métiers. Les candidats sont invités à présenter un projet d'intégration pédagogique dans le campus d'une part et au service de l'établissement national d'autre part.

## **Département d'affectation : Mécanique –Matériaux – Procédés (M2P)**

### **Discipline : mécanique**

**Mots-clés enseignement :** Mécanique du solide, Simulation EF, Science des matériaux, Projets pédagogiques, Conception, Calcul et dimensionnement.

### **Profil recherche**

Le candidat intégrera le Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3-UMR CNRS 7239) au Campus Arts et Métiers ParisTech de Metz. Il viendra renforcer l'axe de Recherche SMART (Systèmes Multiphasés, Applications, Rhéologie, Tenue en service – responsable et personne de contact : professeur Fodil MERAGHNI), au sein du département MMSV du LEM3 dirigé par le professeur Hamid ZAHROUNI.

L'axe SMART a pour objectif scientifique l'analyse et la modélisation multi-échelles du comportement thermomécanique de matériaux multiphasés en particulier les matériaux composites. Les comportements thermomécaniques étudiés par SMART intègrent les mécanismes d'endommagement couplés à la viscoélasticité, la viscoplasticité ou la plasticité (composites à matrice polymère, composites adaptatifs, métaux), et les transformations de phase de type martensitique (aciers, Alliages à Mémoire de Forme (AMF), alliages de titane obtenus par fabrication additive). SMART développe une approche expérimentale originale dédiée à l'analyse multi-échelles du comportement de matériaux et de leurs mécanismes de déformation et d'endommagement associés. Elle est fondée sur le développement d'investigation in-situ (MEB et microtomographie-X) et les mesures de champs cinématiques et thermiques couplées aux méthodes inverses d'identification des paramètres des lois de comportement. Cette approche expérimentale alimente la modélisation des différents comportements et phénomènes étudiés aux échelles pertinentes. Pour cela, SMART développe à la fois des approches d'homogénéisation multi-échelles fines, fondées sur l'emploi d'outils avancés de micromécanique ou d'homogénéisation périodique, et des formulations phénoménologiques macroscopiques à fort contenu physique pouvant être implémentées dans les codes de calcul par éléments finis (EF).

Les modélisations et l'approche expérimentale développée permettent d'une part l'étude des relations microstructure/propriétés/procédés/tenue en service (fatigue multiaxiale et actuation) de produits innovants. D'autre part, elles permettent d'aborder les applications technologiques à forte valeur ajoutée du biomédical et de l'automobile (allègement et durabilité de pièces composites).

Le laboratoire recherche un candidat pour renforcer son activité développant les approches multi échelles pour la modélisation du comportement thermomécanique de matériaux composites à matrice polymère ou des alliages à mémoire de forme. Le candidat recruté contribuera à conforter les activités de SMART dans son approche « material by design » tournées vers les matériaux multiphasés (composites et AMF). Le MCF recruté devra avoir une compétence confirmée dans la formulation de lois de comportement par des approches avancées de micromécanique ou d'homogénéisation périodique et par des approches phénoménologiques à fort contenu physique intégrables dans les codes de calcul par éléments finis (EF). Les candidats ayant un intérêt dans le domaine des matériaux multiphasés et/ou systèmes adaptatifs seront particulièrement pris en considération. Les compétences en implémentation numérique de lois de comportement de matériaux composites et/ou AMF seront fortement appréciées.

Le MCF recruté viendra renforcer les thématiques fortes du Campus de Metz : Analyse de la tenue en service - matériaux composites - industrie automobile. Il contribuera aux actions de recherche en réseau au sein de l'établissement dans le cadre l'Institut Carnot ARTS et des RNC notamment celui en relation avec les matériaux composites (COMPOL) ou les sciences du numérique. Ce poste confortera l'implication de SMART dans les projets structurants impliquant le Campus de Metz (projets FUI, ANR, collaboration avec l'industrie, IRT Jules Verne, Projet NSF, Projet Interreg) et dans le cadre des partenariats internationaux de

l'établissement avec les Etats Unis et l'Allemagne : Georgia Tech, Texas A&M University, KIT (Karlsruhe), TUD (Dortmund), FAU (Erlanger). Ainsi, une bonne pratique de la langue anglaise et une expérience à l'international seraient particulièrement appréciées. Les candidats sont invités à présenter un projet de recherche en mettant en cohérence leurs expériences / compétences scientifiques et les attendus précédemment cités.

**Nom laboratoire :** Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux

**N° unité du laboratoire :** LEM3-UMR CNRS 7239

**Mots-clés recherche :** Mécanique des matériaux, Modélisation multi-échelles, Couplage thermomécanique, Implémentation numérique, Matériaux composites, Alliages à mémoire de forme

**Research fields EURAXESS (Anglais):** Mechanics of materials, Multiscale modelling, Thermomechanical coupling, Numerical implementation, Composite Materials, Shape Memory Alloys

### Autres activités

Le candidat recruté s'impliquera pleinement dans la vie du campus et sera force de proposition pour d'investir dans les actions structurantes et les projets portés par le campus de Metz et par l'établissement national. A terme, le candidat recruté devra s'engager et s'impliquer dans la prise de responsabilités ou d'animation pédagogique au sein du campus. Les candidats sont donc invités à mentionner leurs motivations pour les responsabilités dans leur projet d'intégration en dans le campus d'une part et au service de l'établissement national d'autre part.

**Mots-clés complémentaires :**

### Autres

### Enseignement

**Lieu(x) d'exercice :** ENSAM - Campus Arts et Métiers Metz

**Equipe pédagogique :** Mécanique – Matériaux – Procédés (M2P)

**Directeur du Campus Arts et Métiers ParisTech de Metz:**

Monsieur Stéphane FONTAINE

Tél. : 03.87.54.14.33 / E-mail : [stephane.fontaine@ensam.eu](mailto:stephane.fontaine@ensam.eu)

**Directeur Général Adjoint à la Formation :**

Monsieur Xavier KESTELYN

Tél. : 01.44.24.62.02 / E-mail : [xavier.kestelyn@ensam.eu](mailto:xavier.kestelyn@ensam.eu)

### Recherche

**Lieu d'exercice :** Campus Arts et Métiers Metz

**Nom du Directeur de laboratoire :**

Monsieur El Mostafa DAYA

Tél. : 03.72.74.78.10 / E-mail : [el-mostafa.day@univ-lorraine.fr](mailto:el-mostafa.day@univ-lorraine.fr)

**Contact :** [M.Fodil MERAGHNI](mailto:M.Fodil.MERAGHNI) tél. : 03.87.37.54.59 / E-mail : [fodil.meraghni@ensam.eu](mailto:fodil.meraghni@ensam.eu)

**Directeur Général Adjoint à la Recherche et à l'Innovation :**

Monsieur Ivan IORDANOFF

Tél. : 05.56.84.53.44./ E-mail : [ivan.iordanoff@ensam.eu](mailto:ivan.iordanoff@ensam.eu)

**URL Laboratoire :** <http://www.lem3.fr>

## Descriptif du laboratoire

Intitulé de l'entité : **Laboratoire d'étude des Microstructures et de mécanique des matériaux (LEM3 - UMR CNRS 7239)** Nom du directeur de l'entité: **DAYA El Mostafa**

### Descriptif du laboratoire :

L'objectif scientifique du LEM3 est d'étudier les différents aspects de la mécanique des solides, d'élaboration et de caractérisation microstructurale des matériaux allant de l'échelle de la microstructure du matériau jusqu'à celle du calcul des structures en passant par les procédés de fabrication. Le LEM3 se situe au niveau des meilleures équipes au plan international sur de nombreux sujets, notamment : instabilités plastiques et thermoplastiques, transformations de phase, caractérisation et évolution de microstructure et texture sous traitements thermomécaniques, matériaux intelligents, modélisation multi-échelle, auto-organisation de défauts cristallins, intégrité des surfaces obtenues par des procédés mécaniques, comportement dynamique des matériaux, l'ingénierie pour la santé, usinage à grande vitesse, flambement et vibrations des structures, caractérisation dynamique du comportement des matériaux, modélisation micromécanique, méthodes numériques. Ses compétences couvrent une vaste gamme de matériaux et structures (métaux et alliages, matériaux intelligents, composites, géo-matériaux ...) et d'applications (automobile, aéronautique, énergie, génie civil ...).

**Effectifs estimé au 01/01/2018 :** Environ 140 personnels permanents

100 enseignants-chercheurs ; 7 chercheurs ; 33 techniciens, ingénieurs et autres personnels, 90 post-docs et doctorants.

**Nombre de thèses soutenues en 2017 :** 22

## Fiche HCERES laboratoire (extrait -Axe SMART)

**Equipe Systèmes Multiphasés, Applications, Rhéologie, Tenue en service (SMART) : Bilan (2011-2015)**

### I. Présentation générale de l'équipe et évolutions 2011-2015

L'équipe SMART a pour objectifs scientifiques l'analyse et la modélisation du comportement thermomécanique de matériaux multiphasés. Trois types de phénomènes dissipatifs sont étudiés : la plasticité cristalline dans les métaux, les transformations de phase de type martensitique dans les aciers, les alliages à mémoire de forme (AMF) et les alliages de titane, et les mécanismes d'endommagement et de rupture dans les matériaux composites à matrice polymère et composites adaptatifs. Depuis quatre ans, l'équipe se focalise progressivement sur les procédés de fabrication additive (SLM et CLAD) d'alliages de titane sans nickel et à bas modules d'élasticité pour des applications biomédicales dont l'implantologie. SMART développe une approche expérimentale originale dédiée à l'analyse multi-échelles du comportement de matériaux et de leurs mécanismes de déformation et/ou d'endommagement associés. Elle est fondée sur le développement d'investigation in-situ (MEB et microtomographie-X), l'analyse des contraintes multi-échelles par diffraction des rayons X, l'utilisation des grands instruments pour la mécanique des matériaux (neutrons, synchrotron) et les mesures de champs cinématiques (corrélation d'images) et thermiques (thermographie infra-rouge) couplées aux méthodes inverses d'identification des paramètres des lois de comportement. Cette approche expérimentale alimente la modélisation des différents comportements et phénomènes étudiés. Pour cela, SMART développe à la fois des approches d'homogénéisation multi-échelles fines, fondées sur l'emploi d'outils avancés de micromécanique ou d'homogénéisation périodique, et des formulations phénoménologiques macroscopiques à fort contenu physique pouvant être implémentées dans les codes de calcul par éléments finis (EF). Les modélisations et l'approche expérimentale développée permettent d'une part l'étude des relations microstructure/propriétés/procédés/tenue en service (fatigue multiaxiale et rupture différée) de produits innovants. D'autre part, elles permettent d'aborder les applications technologiques à forte valeur ajoutée comme le biomédical (alliages biocompatibles à bas module d'élasticité, le pancréas bio-artificiel ou le cœur artificiel), et l'automobile (allègement et durabilité de pièces composites).

Les travaux de l'équipe s'articulent autour de trois thématiques complémentaires :

- 1. Modélisation et caractérisation multiéchelles du comportement thermomécanique et de l'endommagement de matériaux multiphasés ;**
- 2. Procédés d'élaboration de solution matériaux et de fabrication de nouveaux alliages et composants ;**
- 3. Analyse de la tenue en service de produits innovants : relation microstructure-procédés-performances.**

Les Membres permanents de l'équipe SMART au 01/01/16 sont :

S. Berveiller	MCF	ENSAM	P. Laheurte (Adj.)	MCF-HDR	UL	L. Peltier	IgE.	ENSAM
N. Bourgeois	MCF	UL	M. Martiny	MCF-HDR	UL	B. Piotrowski	IgR	ENSAM
D. Bouscaud	IgE	ENSAM	F. Meraghni (Resp.)	PR	ENSAM	R. Pesci	MCF	ENSAM
G. Chatzigeorgiou	CR	CNRS	P. Moll	Tech.	UL	V. Tahiri	MCF	UL
Y. Chemisky	MCF	ENSAM	G. Mussot-Hoinard	MCF	UL	M. Wary	IgE.	ENSAM
J. Favre	MCF	ENSAM	A. Nachit	Tech.	ENSAM	A. Zegloul	PR	UL

Au cours de la période, un chargé de recherche CNRS CR1 (G. Chatzigeorgiou, Oct. 2013), deux maîtres de conférences (Y. Chemisky, Sept. 2011 et J. Favre, Sept. 2013) ont été recrutés dans l'équipe. Trois ingénieurs sont arrivés au sein de SMART dans le cadre d'une promotion (M. Wary, IgE ENSAM, Nov. 2012) ou après avoir été ingénieurs contractuels sur support Etat vacant (B. Piotrowski, IgR ENSAM en calcul scientifique, Oct. 2012) ou sur ressources

contractuelles (L. Peltier, IgE-CDI ENSAM en élaboration et caractérisation de matériaux, Sept. 2015). P. Charbonier a été recruté en 2014 en qualité d'IgR CDD. Il est important de noter le départ du membre fondateur de l'équipe E. Patoor (PR) en détachement à Georgia Tech Lorraine (Oct. 2015) ainsi que celui de X. Lemoine (PAST, Sept. 2015). Sur la période 2011-2015, l'équipe a contribué à la publication de 96 articles dans des journaux de rang A, avec une moyenne de 19,2 publications/an. Cela correspond à 2,95 ACL/an/ETP chercheur. 11 thèses ont été soutenues sur la période et 14 thèses sont en cours et 6 post-doctorants ont contribué ou contribuent aux travaux de SMART.

## II. Thèmes de recherche et principaux résultats obtenus :

### Thème 1. Modélisation et caractérisation multiéchelles du comportement thermomécanique et de l'endommagement de matériaux multiphasés.

#### 1. Composites à matrices polymères

##### a. Modélisation des composites à microstructure aléatoire (FUI-DURAFIP 2012-2016)

Le travail de thèse de M. Arif (mars 2014) a permis d'identifier les mécanismes d'endommagement en statique et en fatigue des composites thermoplastiques renforcés par des fibres courtes (PA66-GF30). Les essais in-situ au MEB et en microtomographie ont mis en évidence la cinétique de dégradation en fatigue de ces composites : rupture de fibres, fissuration matricielle et décohésion à l'interface. Ces résultats ont alimenté une modélisation multiéchelles originale du comportement avec endommagement en fatigue développée au cours de la thèse de N. Despringre (Déc. 2015). Le modèle micromécanique incrémental à inclusions enrobées a été enrichi par la description du transfert de charge au travers d'une interface endommagée et validé par analyses numériques (éléments cohésifs). Une méthodologie expérimentale a été également développée pour identifier, aux échelles pertinentes, les paramètres du modèle micromécanique.

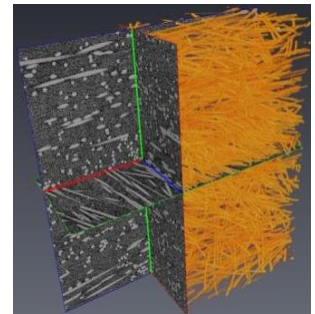


Fig. 1. Observation par  $\mu$ CT-X de la microstructure aléatoire du composite étudié.

Elle est basée sur les essais in-situ (MEB, microtomographie-X) et la caractérisation multi-échelles du comportement thermomécanique. Le modèle intègre ainsi le comportement non-linéaire des constituants, le transfert de charge à l'interface, et les mécanismes d'endommagement. Il constitue une machine virtuelle d'essais permettant la prédiction de l'endommagement de ces composites en intégrant leur microstructure et le trajet de chargement multiaxial.

##### b. Comportement thermomécanique viscoélastique-viscoplastique des polymères (Coll. Renault, FUI DURAFIP)

Plusieurs contributions à la simulation thermomécanique du comportement des polymères ont été apportées par l'équipe. Une bibliothèque de lois du comportement appropriées décrivant la réponse de thermoplastiques (PA66 ou PP) ont été mises en œuvre avec succès dans un cadre 3-D en utilisant une formulation implicite : i) au cours de la thèse de N. Achour (2014-) avec une extension du modèle DSGZ viscoplastique, ii) au cours du Postdoc de A. Benarbia (2015-, LEM3-LMGC) avec un modèle viscoélastique intégrant le couplage thermomécanique et les effets dissipatifs, iii) au cours du Postdoc de D. Anagnostou (2015- LEM3-CEMEF) avec un modèle physique VENU-CEMEF. Les formulations implicites conçues permettent la mise en œuvre des lois de comportement spécifiques dans le cadre de la micromécanique pour composites aléatoires ou périodiques. Du point de vue du comportement multiphysique, en collaboration avec l'Université Friedrich-Alexander d'Erlangen-Nuremberg, une modélisation multiéchelle a été conçue pour étudier les composites polymères magnétomécaniques pendant la cuisson de la matrice polymère.

##### c. Modélisation des composites à microstructure périodique (COPERSIM-IRT Jules Verne, 2014-2017 et Coll. PSA)

Dans le cadre du projet IRT-COPERSIM Fatigue (Composite PERformance SIMulation), une modélisation multiéchelles par homogénéisation périodique est développée pour prédire le comportement en fatigue de composites à renforts continus (tissu sergé 2.2 ou taffetas) et à matrice PA66 (Thèse F. Praud). Ce travail intègre la viscoplasticité couplée aux mécanismes d'endommagement identifiés par ultrasons (Thèse P. Pomarède). Le comportement en fatigue multiaxiale est modélisé en considérant les couplages entre les mécanismes d'endommagement intra et inter-torons liés à la microstructure et la rhéologie de la matrice (viscoélasticité, viscoplasticité).

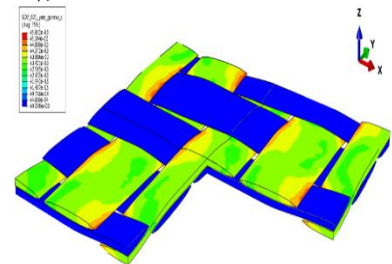
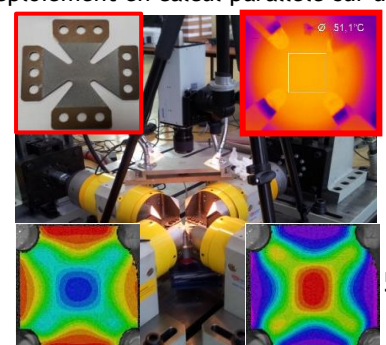


Fig.2. Endommagement par fissuration transverse intra-torons : composite tissé sergé 2.2

#### 2. Alliages à Mémoire de Forme (AMF) et alliages multiphasés

##### a. Caractérisation multiaxiale et comportement de structures en alliage à mémoire de forme

Le développement de nouveaux modèles prenant en compte le comportement complexe, couplé, non-proportionnel des AMF nécessite une caractérisation poussée. L'équipe a constitué une base de données expérimentale du comportement multiaxial de plaques en AMF (Thèse de R. Echchorfi). Un algorithme d'identification spécifique, couplé à une implémentation EF de nos modèles a été développé. Il permet un déploiement en calcul parallèle sur un centre de calculs. Cette méthodologie a permis la simulation numérique d'une peau composite AMF-élastomère pour l'aéronautique. Elle est validée par des tests sur de larges plages de température et déformation. SMART a aussi développé une modélisation multiéchelles pour la simulation du comportement de matériaux composites périodiques à base d'AMF. Récemment, une extension de la théorie de l'homogénéisation périodique a été développée au sein de l'équipe afin de rendre compte des phénomènes dissipatifs et du couplage thermomécanique fort dans les matériaux standards généralisés notamment les composites à base d'AMF. La nanoindentation (thèse C. Caer, en coll. APLI) a



permis de mettre en évidence les discontinuités spatio-temporels induites par la transformation martensitique.

Fig. 3. Essai biaxial à 50 °C sur AMF-NiTi : champs de déformation ( $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ )

#### b. Anisotropie et comportement thermomécanique couplé

L'équipe a développé de nouvelles modélisations du comportement thermomécanique multiaxial, non-proportionnel, en prenant en compte les mécanismes physiques de déformation (Thèse de D. Chatziathanasiou). Ce travail est une généralisation du travail initié par Y. Chemisky, en partant d'une formulation thermodynamique décrivant un couplage transformation-orientation. Le couplage prenant en compte les effets liés à la chaleur latente de transformation et la dissipation a permis de simuler finement le comportement d'actionneurs en AMF. L'anisotropie du comportement induite par la texture a été étudiée au travers d'une modélisation micromécanique du polycristal en AMF. Un modèle autocohérent, couplé à un modèle du comportement du monocristal a servi de machine virtuelle d'essais afin de valider un critère de transformation anisotrope. Ces résultats numériques ont contribué à la formulation de nouvelles lois non-associées décrivant l'évolution de la transformation de phase dans les AMF texturés. Ce modèle sert à déterminer le comportement de nouveaux alliages biocompatibles à base titane (Postdoc de W. Elmay). De plus, en collaboration avec l'Université Texas A&M, le couplage entre viscoplasticité et transformation martensitique a été modélisé afin de prédire le comportement cyclique d'actionneurs en AMF à haute température.

### Thème 2. Procédés d'élaboration de solution matériaux et de fabrication de nouveaux alliages et composants

#### 1. Elaboration et optimisation de solutions matériaux pour les applications biomédicales

##### a. Elaboration de nouveaux alliages de titane métastable. (ANR-TiBBiA Titane Bêta Biocompatible 2009-2012)

La présence d'un implant dans l'os conduit à une redistribution des contraintes mécaniques (stress-shielding) dont l'amplitude est proportionnelle à la différence de rigidité entre l'os et l'implant. Les propriétés mécaniques de l'implant sont donc cruciales pour l'ostéointégration puisqu'elles conditionnent la qualité du transfert de charge à l'interface matériau/os. L'obtention de matériaux mécaniquement biocompatibles se heurte au caractère intrinsèque du bas module d'élasticité de l'os (40 GPa).

L'équipe a développé dans le cadre de l'ANR-TiBBiA de nouveaux alliages de titane bêta métastables (TiNb(Ta/Zr) à bas modules. Les compositions de ces AMF sont formulées à partir de critères électroniques permettant d'apprécier le caractère métastable des alliages  $Ti_B$  au regard de la transformation martensitique  $\alpha''$  et de la phase  $\omega$ . Les investigations ont permis de proposer une microstructure possédant un très bas module proche de 35 GPa, une résistance élevée et une tenue en fatigue comparable à l'alliage de référence (Ti6Al4V). Ce résultat, obtenu dans le cadre de la thèse de W. Elmay (2013), requiert des traitements thermo mécaniques nanostructurants optimisant le comportement mécanique pour les applications envisagées. L'étude de la transformation de phase martensitique a été réalisée au moyen d'essais in-situ en MEB/EBSD et en DRX et a permis la compréhension des mécanismes de réorientation ou de sélection de variantes induites par la contrainte à l'origine de ce bas module. Ces résultats expérimentaux sont complétés par une modélisation micromécanique du monocristal.

##### b. Etude du comportement et de la résistance mécanique d'un pancréas bioartificiel pour l'homme. (Projet FUI MECABARP 2014-2017)

Dans le cadre de l'amélioration des conditions de vie des patients diabétiques, l'entreprise Defymed® a développé un pancréas bio artificiel implantable nommé MAILPAN. Il permet d'encapsuler des cellules sécrétrices d'insuline afin de réguler le taux de glucose. Garantir au patient la résistance du dispositif sous sollicitations est réglementé. Une sollicitation mécanique peut initier des fissures nanométriques impliquant une défaillance du dispositif. L'évaluation des efforts subis sur le site d'implantation est donc très importante : elle peut être réalisée en insérant des capteurs de pression dans un animal et en lui appliquant différentes charges ou mouvements. L'objectif de la thèse de F. Cristofari est de valider les performances mécaniques du MAILPAN sous différentes sollicitations mécaniques (avant/après implantation), au moyen d'un banc d'essai multiaxial développé pour des analyses in situ en MEB, d'identifier les points de faiblesse et de proposer des améliorations. Un modèle numérique 3D, paramétré et couplé à une loi de comportement identifiée expérimentalement, permet de simuler des cas de chargements différents pour diverses configurations géométriques du dispositif et évaluer ainsi les risques de défaillance à diverses échelles.

##### c. Conception et optimisation d'actionneurs en AMF pour implant cardiaque (Coll. Ecole de Chirurgie de Nancy)

L'objectif du projet, démarré en 2013 en collaboration avec l'Ecole de Chirurgie de Nancy, est concevoir et fabriquer un système mécanique de compression du myocarde afin de simuler le battement cardiaque (thèse d'A. Chalon 2015). Les lamelles en AMF permettent d'appliquer un effort cyclique sur la paroi cardiaque. La superélasticité de l'AMF confère une grande flexibilité aux lamelles ainsi qu'une force de rappel au système pour se rouvrir après contraction. Un brevet est actuellement en cours de dépôt et porte sur un dispositif en polymère réalisé par impression 3D.

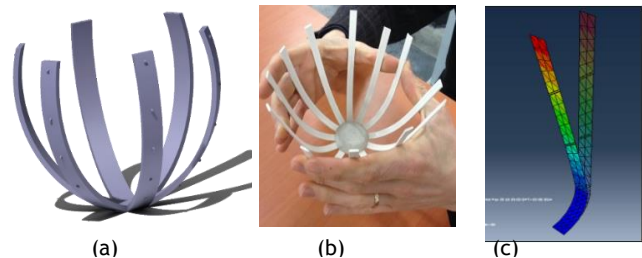


Fig. 4. (a) Lamelles venant serrer le cœur afin de l'assister

(b) Premier prototype (c) Modélisation de la flexion d'une lamelle.

## 2. Fabrication additive (FA)

### a. Mise en œuvre d'alliages de titane (ANR-ELASTICITE 2012-2015, Projet CLAD-MGF, 2015-)

Cette action a permis l'obtention de poudres d'alliages de titane hautement réactif et à haut point de fusion par atomisation gazeuse (Coll. LEM3-LERMPS). Le comportement métallurgique de ces alliages  $Ti_{\beta m}$  est analysé en relation avec leur bas module d'élasticité. Un gradient de propriétés élastiques est obtenu par rechargement d'un substrat en  $Ti6Al4V$  par le procédé CLAD®. La collaboration avec les chirurgiens du CHU de Strasbourg a abouti à la réalisation d'un démonstrateur : prothèse totale de hanche. Ce projet se poursuit depuis 2015 dans le cadre de la thèse de C. Schneider-Maunoury en collaboration la société IREPA-LASER. L'objectif est l'élaboration par le procédé de fabrication additive CLAD de multi-Matériaux à Gradients de Fonction (MGF) contrôlable à travers la composition chimique du dépôt.

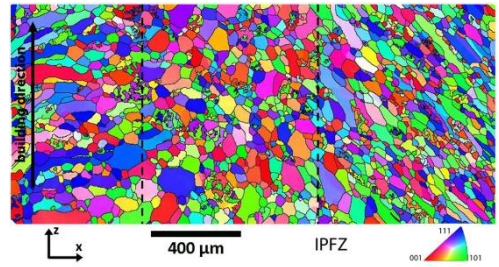


Fig. 5. Cartographie EBSD d'un dépôt de  $TiNb$  réalisé par CLAD

### b. Fabrication et simulation de prothèses sur-mesure en alliage de titane. Projet FAPROM (2013-2017)

Le projet FAPROM (Fabrication Additive de PROthèses sur Mesure) est dédié à la fabrication de prothèses sur mesure en alliages  $Ti_{\beta}$  par FA de type Selective Laser Melting (SLM) (thèse de M. Fischer 2014) en partenariat avec le service Maxillo-Facial du CHU-Nancy. Des stratégies innovantes permettant d'élaborer in-situ l'alliage à partir de mélanges de poudres élémentaires sont étudiés. L'ajustement des compositions tient compte de la présence de l'oxygène et permet le contrôle des propriétés mécaniques. Cette action a ouvert la voie vers le développement, avec les cliniciens, d'un démonstrateur avec des propriétés isoélastiques. Le transfert de charge dans l'os péri-implanté est étudié.

### c. Mise en œuvre de superalliages destinés à la réparation par rechargement (FUI-NENUFAR 2015-)

L'équipe est impliquée dans un projet stratégique portant sur la réparation de pièces aéronautiques (parties chaudes de turbines) fabriquées par fonderie (thèse d'A. Doghri en cotutelle avec l'ONERA). Ce projet porte sur la confrontation modèle-expérience pour le rechargement laser par procédé CLAD de poudres de superalliages à base Nickel réputés non-soudables.

## Thème 3. Analyse de la tenue en service de produits innovants : relation microstructure-procédés-performances

### 1. Relation microstructure-procédés-tenue en service

#### a. Tenue en fatigue et endommagement de matériaux composites (COPERSIM-IRT-JV, 2014-2017 et Coll. OCY)

Les stratégies de modélisation-caractérisation multiéchelles développées sont appliquées pour la prédiction de la tenue en fatigue de pièces composites. Elles ont permis de prédire la contrainte de cisaillement résolue à l'interface de mèches de composites hybrides SMC (Sheet Moulding Compound) et d'améliorer la simulation de la tenue en fatigue de composants automobiles (Postdoc D. Anagnostou, 2014). L'analyse des relations microstructure-procédés-tenue en service de composites SMC-C (renforts carbone) est menée dans le projet COPERSIM (thèse de C. Nony-Davadie). La microstructure, induite par le procédé de thermocompression, est caractérisée par une technique de microtomographie originale spécifique aux renforts carbone. L'endommagement en fatigue des SMC-C est modélisé en intégrant la rupture aux interfaces intra-mèches et inter-mèches et les fissures transverses.

#### b. Sensibilité à la rupture différée des aciers à très haute résistance (Coll. ArcelorMittal, 2014-2016)

Les processus de traitement thermique et de mise en forme à chaud des tôles d'acier génèrent de fortes contraintes internes d'origine mécanique et métallurgiques induites par la transformation martensitique lors du refroidissement. Ces contraintes résiduelles associées à la présence d'hydrogène, absorbé au cours de l'élaboration, peuvent entraîner la rupture prématurée de l'acier. L'objectif est de quantifier ces contraintes internes par diffraction-X en fonction du traitement thermique et des conditions de refroidissement. Ces dernières sont réalisées au moyen d'un simulateur thermomécanique Gleeble. En parallèle, l'enceinte du simulateur et les éprouvettes ont été modélisées avec le logiciel STARCCM+ ©. Les zones de contraintes maximales ont ainsi été associées aux zones de plus grand débit de gaz lors de la trempe. L'étude se poursuit en 2016 sur des tôles mises en forme sur une presse semi-industrielle. Un essai de flexion in-situ est développé afin d'estimer un niveau de contrainte critique pour la rupture différée.

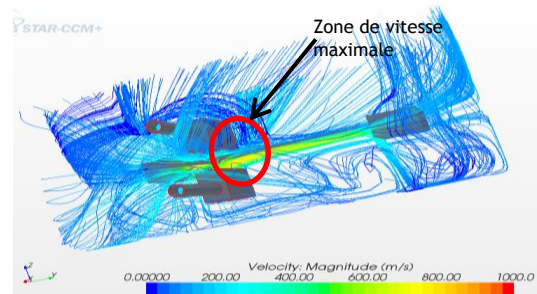


Fig. 6. Visualisation des lignes de courant d'hélium dans l'enceinte de la machine Gleeble ©

### 2. Déformations et contraintes dans les empilements de matériaux ou induites par les procédés

#### a. Contraintes résiduelles dues au grenailage et leur relaxation sous sollicitation thermomécanique dans les aciers TRIP. Projet IRT M2P-CONDOR (CONtraintes DimensiOnnement Relaxation 2013-2018)

L'objectif est d'étudier l'influence des contraintes résiduelles générées par le grenailage et de leur relaxation en service sur la tenue en fatigue de pièces (thèse de R. Guiheux, 2013-2016). Une loi de comportement des aciers TRIP compatible avec les modèles de simulation du grenailage est développée afin d'estimer les contraintes de grenailage à l'échelle des phases. Une approche semi-phénoménologique en viscoplasticité est envisagée pour intégrer les vitesses de sollicitation générées lors du grenailage. Enfin, la thèse de C. Mauduit (2014-2016) exploite les champs de contraintes de grenailage comme données d'entrée pour étudier la relaxation des contraintes au cours de

sollicitations thermomécaniques. Deux matériaux à gradient sont étudiés : un acier TRIP avec gradient de déformation dans l'épaisseur, et un acier cémenté avec gradient de microstructure et de contraintes résiduelles initiales. Les essais de relaxation à faible nombre de cycle et de fatigue oligocyclique sont confrontés aux simulations numériques.

**b. Analyse des déformations et contraintes au sein d'un empilement 3D de type System-in-Package. Projet 3DPack-CEATECH (2014-2017)**

La miniaturisation et la performance sont pondérées par des impératifs de fiabilité à moindre coût, et d'architectures flexibles (design de packaging). La connaissance des architectures et de leur mécanique apparaît donc comme une compétence essentielle pour garantir l'intégrité et la fiabilité d'un composant électronique. La simulation développée est nourrie de données matériaux connues en fonction de la température de fonctionnement (dissipation thermique) et d'utilisation (normes environnementales). Elle est validée par une caractérisation fine aux échelles de travail (nano/micrométriques). Le projet vise : (i) l'extraction des paramètres matériaux des couches, en vue d'alimenter un outil de simulation. Cela nécessite une mesure des déformations et des contraintes à différentes échelles (DRX, microdiffraction Kossel en MEB) ; (ii) le développement d'un modèle numérique afin de simuler le comportement de chaque composant, chaque couche, lors du procédé de mise en forme, et de prédire les hétérogénéités de déformation et de contrainte.

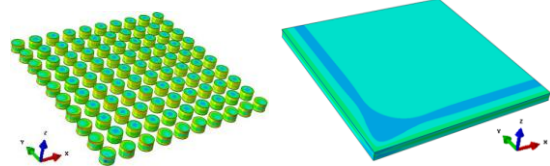


Fig. 7. Modélisation des plots dans un semi-conducteur

**3. Fiabilité des assemblages en microélectronique et des circuits imprimés**

**a. Optimisation de la tenue à haute température des brasures au travers d'un nouvel alliage sans plomb (2014-).**

La directive européenne RoHS impose l'utilisation d'alliages sans plomb pour les soudures dans le cadre d'assemblages microélectroniques en haute température. Il n'existe pas encore de substituts fiables, y compris dans les pays à faible coût de production. La thèse de M. Wary développe des substituts fiables et performants, tout en limitant leur toxicité et en favorisant leur retraitement/recyclage. L'objectif est de créer un nouvel alliage sans plomb, non toxique, en accord avec les réglementations. Le procédé de brasage visé est le procédé de refusion, à partir d'une crème à braser. M.Wary a mis en place une modélisation thermodynamique des compositions d'alliages potentiels répondant au cahier des charges, la caractérisation de leurs propriétés physiques et enfin l'élaboration de crème à braser pour valider ses performances sur démonstrateur d'assemblages.

**b. Fiabilité des circuits imprimés (ANR LabCom LEMCI 2014- et projet Européen EUREKA (EURIPIDES)).**

Cette action commune aux équipes CeDyn et SMART du LEM3-UMR 7239 a essentiellement pour but de comprendre les différents facteurs limitant la durée de vie de circuits imprimés. Initiée en 2008 en collaboration avec CIMULEC, elle a conduit à un projet entre MBDA et CIMULEC avec le soutien de la DGA via le dispositif RAPID (Régime d'Appui aux PME pour l'Innovation Duale), puis à la signature d'un projet européen EUREKA (EURIPIDES). Fin 2014, une ANR LabCom LEMCI dédiée à la création d'outils de prédiction de la fiabilité des circuits imprimés a démarré.

**III. Rayonnement, attractivité de l'équipe**

Les travaux de l'équipe en modélisation micromécanique ont permis d'attirer la candidature de G. Chatzigeorgiou sur un poste chercheur CNRS. La qualité du dossier scientifique et la pertinence du projet d'intégration lui ont permis d'intégrer SMART en oct. 2013 directement en tant que CR1. La production scientifique de l'équipe a connu une hausse significative sur la période (96 ACL avec un taux de 2.95 ACL/an/ETP chercheur). Les articles de l'équipe sont publiés dans des journaux de référence et à fort impact dans nos thématiques. Certains articles sont considérés comme des publications majeures et figurent en tête de liste des articles les plus cités ou bénéficient d'un taux de citation moyen de 7 citations par an (Source Scopus). 4 brevets (Europe) ont été déposés entre 2011-2015.

L'équipe est impliquée dans 19 projets collaboratifs dont certains en tant que coordonnateur avec un financement : International (IIMEC- NSF-Award #0841082), Européen (ITN-SOTERIA, CURIE-ETN/ITN-EURIPIDES), FEDER (PREUCAT, FAPROM) ou National (ANR-ELASTICITE, ANR-TiBbIA, ANR-Labcom LEMCI, ANR-XXForming, FUI-DURAFIP, FUI-NENUFAR, FUI-MECABARP, PIA-IRTJV-COPERSIM, PIA-IRTM2P-CONDOR, IC-CF4A, IC-OMP-ARCHI-SLM, GLEEBLE-RL-OpenLab et 3DPack-CEATECH, MomeQa-BPI). Ces projets ont été l'occasion de renforcer les nouvelles orientations de l'équipe comme la fabrication additive d'alliages de titane. Ils ont également conforté les activités historiques et reconnues de l'équipe sur les AMF et les composites ou sur l'analyse de contraintes résiduelles. Une habilitation à diriger des recherches a été soutenue (P. Laheurte) et trois autres sont en cours de préparation. Deux doctorants de l'équipe ont reçu le prix de thèse Bézier (D. Bouscaud, 2013 et W. Elmay, 2014). W. Elmay a été lauréate du prix de thèse de l'Asso. Française de Titane en 2014. De plus, un des projets de l'équipe porté par E. Patoor a reçu en 2014 la distinction nationale : *MBDA-1-Star-Innovation-Award*. Les membres de SMART contribuent activement à des actions structurantes pour la recherche. E. Patoor et F. Meraghni ont coordonné deux projets régionaux dans le cadre du CPER-PRST-MEPP (Matériaux-Energie-Produits-Procédés 2007-2014) en relation avec les autres laboratoires lorrains. S. Berveiller a été co-responsable du *Réseau Contraintes* à l'ENSAM. Ce réseau national a structuré et fédéré les utilisateurs et les développeurs de techniques d'analyses de contraintes (2008-2014). La période a été marquée par l'organisation de plusieurs manifestations scientifiques par l'équipe : 4th *annual meeting IIMEC* en mai 2013 à Metz (50 participants), Colloque en l'honneur du Pr. Marcel Berveiller (4 avril 2013 à Metz, 100 personnes). F. Meraghni a co-organisé en juin 2011 un Symposium (ICM11, 80 participants). Enfin, l'équipe SMART a obtenu, en 2015, l'organisation de la conférence ESOMAT à Metz, 2018. Les co-Chairmen sont E. Patoor et T. Ben Zineb (LEMTA).

**IV. Collaborations nationales et internationales**

La pluridisciplinarité des travaux de l'équipe constitue un atout. La complémentarité des compétences est ainsi recherchée à plusieurs niveaux ; au sein de l'équipe et au sein du laboratoire mais également au travers de collaborations nationales et internationales et au travers de partenariats avec des industriels. Sur le plan



international, l'équipe développe des relations des équipes reconnues aux USA et en Europe. On citera l'implication de l'équipe au sein du programme d'échanges internationaux (2010-2015) : International Institute for *Multifunctional Materials for Energy Conversion* (IIMEC) coordonné par Texas A&M University. Chaque année l'équipe contribue à l'IIMEC *School on Computational Materials Science* organisée à Texas A&M. D'autres collaborations fortes en France et à l'international sont menées par les membres de l'équipe et se sont concrétisées par des implications dans des projets de recherche et des articles communs. Ces collaborations ont permis aux membres de l'équipe d'encadrer des thèses en cotutelle, d'effectuer des séjours courts ou bien des CRCT à l'étranger (Y. Chemisky à Ryerson University Canada 2015) et contribuent amplement à leur rayonnement à travers les participations aux comités internationaux d'expertise de projets ou aux jurys de thèse à l'étranger. Les collaborations portées par l'équipe SMART (liste non exhaustive) sont avec les entités suivantes : Ryerson University, Georgia Tech, Texas A&M University, Penn State University, Univ. Gent, Univ. Brescia, TU Dortmund, Fraunhofer LBF Darmstadt, Univ. Thessaloniki, Friedrich-Alexander-Universität, KU Leuven, Imperial College, ENP et EMP (Algérie), Tohoku University, CEMEF, LMGC Montpellier, Roberval-UTC, LEMTA, ESRF, ILL, Chimie ParisTech, INSA Rennes, FEMTO-ST, Ecole de Chirurgie de Nancy.

#### V. Interaction avec l'environnement social et économique

L'équipe SMART est en très forte interaction avec l'environnement économique. Elle porte de nombreuses collaborations industrielles, avec des structures de périmètres très différents : établissements publics, grands groupes nationaux et internationaux et petites et moyennes entreprises. Sur la période (2011-2015), les actions de recherche à finalité industrielle représentent un budget total consolidé de **5.58 M€** (TTC) correspondant à **1.12 M€** par an.

Deux faits marquants témoignent de cette forte interaction avec l'environnement socio-économique. Le premier concerne la création en 2012 de la société MicroMecha par un membre de l'équipe (R. Pesci). Cette société développe des micromachines d'essai mécanique et des solutions adaptées pour le MEB et les techniques de diffraction. Elle a été distinguée par le concours national d'aide à la création d'entreprises de technologies innovantes. Le deuxième point est l'arrivée en 2015 au sein de l'équipe de la plateforme expérimentale de caractérisation thermomécanique Gleeble 1500. Cet équipement phare provient d'un don de PSA Peugeot-Citroën à SMART dans le cadre de leur partenariat au sein de l'OpenLab (M&P) Matériaux et Procédés (Coord. F. Meraghni) regroupant PSA, ENSAM, Georgia Tech Lorraine, Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) et CNRS.

Les actions de recherche en relation avec les applications biomédicales, en fort développement dans SMART, adressent des enjeux sociétaux importants et devraient accroître nos interactions avec la société et le tissu industriel.

#### Réalisations et résultats marquants de l'équipe SMART sur la période du bilan HCERES 2011-2015

- Elaboration de poudres d'alliages de titane hautement réactif et à haut point de fusion par atomisation gazeuse destinées la fabrication d'implants biocompatibles à bas module d'élasticité (ANR élasticité, 1 brevet, Sun *et al.* 2011 et W. Elmay *et al.* 2013). Ce résultat a ouvert la voie vers l'élaboration in-situ d'alliage  $Ti_{\beta}$  par fabrication additive (SLM) et l'étude du transfert de charge dans l'os péri-implanté via un démonstrateur (prothèse) ayant des propriétés isoélastiques.
- Développement et optimisation de nouvelles solutions matériaux pour les applications biomédicales. Nos travaux sur le pancréas bioartificiel, substitut d'os en titane poreux (Barbas *et al.* 2012) ou l'actionneur pour l'implant cardiaque (myocarde) ont permis d'exploiter les développements de l'équipe en termes de caractérisation *operando*, in situ dans des environnements représentatifs (4 brevets sur la machines d'essai multiaxial in-situ,) et de modélisation multiéchelle fine et simulation avancée de composants en AMF. Ces résultats apportent des solutions aux enjeux sociétaux importants et confortent nos interactions avec l'environnement socio-économique.
- Caractérisation in-situ, en MEB et en microtomographie-X, des mécanismes d'endommagement dans les composites à microstructure aléatoire (PA66/GF30, FUI-DURAFIP, Arif *et al.* 2014a, Arif *et al.* 2014b) ou périodique (PA66/sergé 2.2, COPERSIM-Fatigue). Ce résultat a contribué à l'identification des cinétiques d'endommagement en fatigue et alimente ainsi nos modèles multiéchelles intégrant les couplages de la viscoélasticité ou de la viscoplasticité à l'endommagement (bibliothèque SMART+ : Smart Materials Algorithms & Research Tools).
- Extension originale du cadre théorique de l'homogénéisation périodique, développée au sein de l'équipe, à la prise en compte des phénomènes dissipatifs et du couplage thermomécanique fort dans les matériaux standards généralisés (G. Chatzigeorgiou *et al.*, 2016). Le cadre thermodynamique généralisé a été appliqué avec succès au modèle phénoménologique développé par SMART aux AMF dont le comportement présente une anisotropie et une dissymétrie traction-compression induites par l'effet de texture (Y. Chemisky *et al.* 2011, D. Chatziathanasiou *et al.* 2015).
- Nos travaux sur les relations microstructure-procédé-tenu en service ont abouti à l'établissement des effets de microstructure sur la rupture différée et sur la tenue en fatigue des aciers TRIP ou celle de matériaux composites pour l'automobile ainsi que sur la réparabilité de parties chaudes de turbines par rechargement laser (procédé CLAD) de poudre de superalliages à base Nickel. Ces résultats majeurs sont confortés par les expérimentations récemment développées dans l'équipe et exploitant la plateforme Gleeble, la microtopographie-X, la plateforme SLM ou le creuset froid pour l'élaboration d'alliages à haute entropie (HEA).

Sun, F, Y L Hao, S Nowak, T Gloriant, P Laheurte, and F Prima. (2011). A Thermo-Mechanical Treatment to Improve the Superelastic Performances of Biomedical Ti-26Nb and Ti-20Nb-6Zr (at.%) Alloys. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 4 (8): 1864–72. 42 citations avec 7 citations/an (scopus).

- Chemisky Y, Duval a., Patoor E, Ben Zineb T. (2011) Constitutive model for shape memory alloys including phase transformation, martensitic reorientation and twins accommodation. *Mech Mater.*; 2011;43(7):361–76. 58 citations avec 9.7 citations/an (scopus)
- Barbas, A, A-S Bonnet, P Lipinski, R Pesci, and G Dubois. (2012). Development and Mechanical Characterization of Porous Titanium Bone Substitutes. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 9 (May): 34–44. 34 citations avec 6.8 citations/an (scopus).
- Elmay, W, F Prima, T Gloriant, B Bolle, Y Zhong, E Patoor, and P Laheurte. (2013). Effects of Thermomechanical Process on the Microstructure and Mechanical Properties of a Fully Martensitic Titanium-Based Biomedical Alloy. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 18 (February) : 47–56. 19 citations avec 4.8 citations/an (scopus).
- Arif MF, Meraghni F, Chemisky Y, Despringre N, Robert G. (2014a) In situ damage mechanisms investigation of PA66/GF30 composite: Effect of relative humidity. *Compos Part B Eng.*; 2014;58:487–95. 20 citations avec 7.7 citations/an (scopus)
- Arif MF., Saintier N., Meraghni F., Fitoussi J., Chemisky Y., Robert G. (2014b). Multiscale fatigue damage characterization in short glass fiber reinforced polyamide-66. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 61, (2014), pp. 55-65. 14 citations avec 5.7 citations/an (scopus)
- Chatziathanasiou D, Chemisky Y, Meraghni F, Chatzigeorgiou G, Patoor E. (2015). Phase Transformation of Anisotropic Shape Memory Alloys: Theory and Validation in Superelasticity. *Shape Mem Superelasticity*. 2015 Aug 4;1(3):359–74.
- Chatzigeorgiou G, Charalambakis N, Chemisky Y and Meraghni P., (2016). Periodic homogenization for fully coupled thermomechanical modeling of dissipative generalized standard materials (accepted for publication in *Int. J. of Plasticity*, in press 2016, Doi: 10.1016/j.ijplas.2016.01.013)