

## Projet de Recherche

**1. Titre :** Modélisation de la dynamique de l'impact. Applications aux matériaux qui peuvent subir des transformations de phase ou phénomènes d'écaillage.

**2. Participants :** Cristian Făciu (Institut de Mathématiques "Simion Stoilow" de l'Académie Roumaine (IMAR) ), Alain Molinari et Sébastien Mercier (Université Paul Verlaine - Metz, Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux (LPMM) - UMR 7554).

**3. Description du projet :** La collaboration entre les chercheurs participants à ce projet existe depuis quelques années. Les résultats obtenus durant le Programme EURROMMAT 2001-2004 (Institut de Mathématiques - centre d'excellence de la Commission Européenne dans le FP5) se sont concrétisés par des publications communes et communications aux réunions scientifiques [1,2]. L'intérêt scientifique commun converge vers la modélisation mathématique et physique du comportement dynamique des matériaux [3,7].

L'impact entre deux plaques (projectile et cible) constituées de matériaux pouvant subir un changement de phase ( par exemple les alliages à mémoire de forme) a été proposé comme une modalité pour mieux comprendre la cinétique de la transformation de phase. La propagation de l'interface entre phases lors de la transformation austénite-martensite, ou vice-versa, ne peut pas être observée directement car sa vitesse de déplacement est beaucoup plus faible que la vitesse des ondes acoustiques. Par contre, sa présence peut se modéliser par la théorie d'Hadamard des ondes de choc et leurs interactions. Ces phénomènes in-situ peuvent être détectés par des mesures d'interférométrie effectuées sur la surface libre de la cible. Dans une première approche, l'impact longitudinal des barres minces a été considéré pour le cas isotherme en [1,2] alors qu'en [3], les effets thermiques ont été pris en compte. Le comportement des matériaux est décrit par une loi thermoélastique avec une énergie libre non-convexe et régularisation visqueuse de type différentiel. La problématique correspond aux systèmes avec lois de conservation mixtes de type hyperbolique-elliptique. Cette recherche qui relie des aspects mathématiques, thermodynamiques et expérimentaux a permis la description de la structure des ondes qui accompagnent la transformation de phase directe et inverse dans le cas unidimensionnel. L'analyse des ondes progressives pour le modèle de type différentiel a fourni le critère d'admissibilité pour les ondes de choc et pour les interfaces. Ces discontinuités sont des chocs classiques compressifs obéissant au critère entropique de Lax. Dans le cadre de ce projet nous allons continuer à analyser certains aspects concernant le rôle de la viscosité et de la conductivité thermique dans la structure d'une discontinuité (choc ou interface). Au point de vue mathématique, les difficultés majeures à résoudre sont

liées à l'unicité de la solution du problème de Riemann et de Goursat pour systèmes hyperboliques quasilineaires. La prise en compte dans la modélisation des effets de capillarité (voir [8,9]) peuvent mener à la consideration de chocs non-classiques (voir [10]). Ces chocs admissibles peuvent-être sous-compressifs n'obéissant plus aux conditions entropiques de Lax. Ainsi, des critères de sélection différents conduisent à des solutions uniques différentes pour le même problème d'impact. La solution physique peut-être retenue en associant à cette analyse mathématique, une recherche expérimentale systematique comme celle proposée en [1].

Une autre direction de recherche, étroitement liée à la première, dans laquelle le LPMM a une importante expertise est la modélisation des phénomènes d'écaillage (voir [6, 7, 11]). L'écaillage est le résultat de l'endommagement dynamique observé dans une structure soumise à l'impact d'un projectile. L'origine physique de ce phénomène est intimement liée à la mécanique des ondes de choc. Ainsi, dans un essai d'impact de plaques, le projectile, en frappant la cible, génère des ondes de compression qui vont se propager de part et d'autre de la surface de contact. Lorsque ces ondes rencontrent les surfaces libres de l'impacteur et de la cible, elles se réfléchissent en ondes de tension. Le plan d'écaillage situé à l'intérieur de la cible, lieu de croisement de ces ondes de tension, va alors subir un fort endommagement. Si la vitesse de l'impacteur est suffisamment élevée, un phénomène de rupture peut apparaître.

Un modèle d'endommagement en conditions dynamiques a été proposé en [6,12]. L'approche prend en compte la phase de nucléation et de croissance des cavités. Par la suite, un modèle complet élasto-viscoplastique avec endommagement [7] a été proposé et implanté dans un code de calculs aux éléments finis. L'essai d'impact de plaques a été simulé et les résultats obtenus révèlent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux sur le tantale issus de la littérature [13]. Ainsi, il nous a été possible de reproduire les vitesses de face arrière expérimentales. Comme pour la problématique avec changement de phase, le profil de vitesse est directement lié aux couplages entre propagation des ondes dans la cible et endommagement. L'objectif de cette deuxième partie est de décrire la propagation des ondes dans la cible lors de l'impact en tenant compte de la plasticité et de l'endommagement. Dans un premier temps, le cas plus simple élasto-plastique va être étudié et les problèmes de Goursat et Riemann seront résolus. Dans un deuxième temps, l'effet de l'adoucissement lié à l'endommagement devra être intégré à la modélisation.

Objectifs scientifiques à suivre : 1) Développer et améliorer les lois de comportement basées sur une énergie libre non-convexe capable de décrire des aspects thermomécaniques observés expérimentalement liés aux transformations de phase solide-solide. Développer et améliorer des lois de comportement pour les phénomènes d'endommagement dynamique. Analyse thermodynamique des modèles considérés.

2) Etude théorique et numérique des solutions aux problèmes initiales et aux limites correspondant aux différentes interactions dynamiques. Développer des schémas numériques avec un contrôle énergétique pour la stabilité numérique. 3) Simulations numériques des essais physiques. Comparer les prédictions des modèles avec les essais de laboratoire connus.

### Bibliographie

- [1] C. Făciu, A. Molinari, *On the longitudinal impact of two phase transforming bars. Elastic versus a rate-type approach. Part I : The elastic case. Part II : The rate-type case*, International Journal of Solids and Structures, 43, 497-522, 523-550, (2006).
- [2] C. Făciu, A. Molinari, *On modeling the longitudinal impact of two shape memory bars* in "Mechanics of the 21<sup>st</sup> Century", Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Warsaw, Poland, (2004), Eds. W. Gutkowski and T.A. Kowalewski, 11852.pdf, Springer 2005, ISBN-10 1-4020-3559-4 (e-book), CD-Rom ISBN-1-4020-3456-3.
- [3] C. Făciu, A. Molinari, (key-note lecture) *On impact induced propagating phase boundaries. Thermal effects*, pp. 27-40, Eds. W. K. Nowacki, Han Zhao, Proceedings of the 10th European Mechanics of Materials Conference, Multi-phases and multi-components materials under dynamic loading, June 11-14, 2007 Kazimierz Dolny, Poland, ISBN 978-83-89687-16-6, Publisher IPPT - Polish Academy of Sciences, (2007).
- [4] A. Molinari, G. Ravichandran, *Fundamental structure of steady plastic shock waves in metals*, J. Appl. Phys., 95, 1718-1732, (2004).
- [5] A. Molinari, G. Ravichandran, *Modeling plastic shocks in periodic laminates with gradient plasticity theories*, J. Mech. Phys. Solids 54, 2495-2526, (2006).
- [6] C. Czarnota, S. Mercier, A. Molinari, *Modelling of nucleation and void growth in dynamic pressure loading, application to spall test on tantalum*, Int. J. Frac., 141, 177-194, (2006).
- [7] C. Czarnota, N. Jaques, S. Mercier, A. Molinari, *Modelling of dynamic ductile fracture and application to the simulation of plate impact test on tantalum*, J. Mech. Phys. Solids, 56, 1624-1650, (2008).
- [8] R. Abeyaratne, J. K. Knowles, *Implications of viscosity and strain-gradient effects for the kinetics of propagating phase boundaries in solids*, SIAM J. Appl. Math., 51, 1205-1221, (1991).
- [9] R. Abeyaratne, J. K. Knowles, *A continuum model of a thermoelastic solid capable of undergoing phase transitions*, J. Mech. Phys. Solids, 41, 541-571, (1993).
- [10] Ph. G. LeFloch, *Hyperbolic Systems of Conservation Laws - The theory of classical and nonclassical shock waves*, Lectures in Mathematics, ETH - Zürich, Birkhäuser Verlag, Basel-Boston-Berlin, (2002).
- [11] A. Molinari, T. W. Wright, *A physical model for nucleation and early growth of voids in ductile materials under dynamic loading*, J. Mech. Phys. Solids 53, 1476-1504, (2005).

[12] A. Molinari, S. Mercier, *Micromechanical modelling of porous materials under dynamic loading*, J. Mech. Phys. Solids 49, 1497-1516, (2001).

[13] G. Roy, *Vers une modélisation approfondie de l'endommagement ductile dynamique. Investigation expérimentale d'une nuance de tantale et développements théoriques*, Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aéronautique, Université de Poitiers, France, (2003).

#### **4. Visites envisagées :**

Côté Roumanie - à Metz - 1 semaine en 2009 (une visite) et 1 semaine en 2010 (une visite).

Côté France - à Bucarest - 3 semaines en 2009 (deux visites) et 3 semaines en 2010 (deux visites).

#### **5. Financement demandé au Laboratoire Européen Associé CNRS Franco-Roumain :**

Frais d'hébergement et per diem pour 8 semaines de séjour, 2 semaines en France et 6 semaines en Roumanie. Frais de voyage : deux voyages aller-retour Bucarest - Metz et quatre voyages aller-retour Metz - Bucarest.

#### **6. Notice individuelle - Cristian Făciu**

Poste détenu actuellement : Directeur de recherche de première classe à l'Institut de Mathématiques Simion Stoilow de l'Académie Roumaine. Formation :

1979 - Diplôme d'Études Supérieures en Mathématiques (licence), à la Faculté de Mathématiques de l'Université de Bucarest (4 ans).

1980 - Diplôme de Spécialisation en Mécanique des Solides, (équivalent DEA) à la Faculté de Mathématiques de l'Université de Bucarest (1 an).

1989 - Doctorat ès Sciences Mathématiques (spécialisation mécanique) à l'Institut de Mathématiques de l'Académie Roumaine des Sciences.

Bourse de haut niveau au Laboratoire Génie Physique et Mécanique des Matériaux, Ministère de la Recherche et de la Technologie de France, nov. 1990 - oct. 1991.

Bourse de recherche Alexander von Humboldt, Technische Universität Berlin, Institut für Thermodynamik und Reaktionstechnik (mar. 1992 - jul. 1993)

Stages scientifiques, invitations et collaborations à l'étranger : Université de Metz, IPPT-Varsovie, Université de Poitiers, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Ecole Centrale de Lyon, Technische Universität München, Weierstrass Institute Berlin, Institut National Polytechnique de Grenoble

Activités de recherches : Théorie de la propagation des ondes. Transformation de phases dans les corps solides. Instabilités plastiques et phénomènes de localisation de la déformation.

## **7. Notice individuelle - Alain Molinari**

Poste détenu actuellement : Professeur, classe exceptionnelle, Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux, Université Paul Verlaine, Metz.

Formation :

1970 Maîtrise de mathématiques, Université Louis Pasteur, Strasbourg

1971 Agrégation de Mathématiques

1972 Diplôme d'Etudes Approfondies en Mécanique, Université Louis Pasteur, Strasbourg

1979 Thèse d'Etat en Mathématiques, option Mécanique Théorique, "Ondes Transitoires en Milieux Solides Dissipatifs", Université de Metz.

Gledden Senior Fellowship, University of Western Australia (1997)

Millikan Distinguished Visiting Professor , California Institute of Technology, USA.(1996, 2002) and visiting professor (2004, 2005, 2007)

Distinguished Scholar, University of Western Australia (1995)

Grand Prix de la Recherche des Universités de Lorraine (1980)

Stages scientifiques, invitations et collaborations : Nombreuses invitations dans des universités étrangères dont University of Western Australia, California Institute of Technology, Université Carlos III de Madrid.

Activités de recherches : Modélisation du comportement des matériaux (polycristaux visco-plastiques, approches micro-macro, grandes vitesses de déformation) Instabilités matérielles Endommagement dynamique Procédés de mise en forme à grandes vitesses Impacts, ondes de choc et endommagement (transformations de phases, endommagement par nucléation et croissance de micro-vides)

## **8. Notice individuelle - Sébastien Mercier**

Poste actuel : Maître de Conférences, Section 60 à l'Université Paul Verlaine -Metz.

Formation :

1993 Ingénieur Ecole Centrale Paris

1997 Docteur en Mécanique de l'Université de Metz

2008 Habilitation à Diriger des Recherches

Stages scientifiques, invitations et collaborations à l'étranger : Université de Liège, IPPT de Varsovie, Université fédérale de Fluminense - Brésil

Activités de recherche : Approche micromécanique, Instabilités viscoplastiques, Localisation de la déformation.