

Bilan pour l'année 2009 du projet de recherche

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

Participants :

Cristian Făciu, Institut de Mathématiques "Simion Stoilow" de l'Académie Roumaine (IMAR)

Alain Molinari, Université Paul Verlaine - Metz, Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux (LPMM) - FRE 3236

Sébastien Mercier, Université Paul Verlaine - Metz, Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux (LPMM) - FRE 3236

Activités :

- Visite de Sébastien Mercier à Bucarest du 10 octobre au 30 octobre 2009 financée par le LEA. Activité de recherche sur la thématique : Modélisation de la dynamique de l'impact - application à l'écaillage. Les résultats obtenus et les directions à poursuivre sont résumés au paragraphe suivant **(a)**. Travail en cours de rédaction.
- Conférence de Sébastien Mercier à la Faculté des Sciences Mathématiques de l'Université de Bucarest, 22 octobre, 2009, intitulée
A micromechanical constitutive model for dynamic damage and fracture of ductile materials. Application to spalling.

Il faut ajouter que la collaboration entre les chercheurs participants à ce projet existe depuis longtemps et s'est concrétisée par des publications communes et communications en conférences [1,2,3]. Ces résultats sont liés à la thématique du projet. De nombreuses visites scientifiques ont été effectuées par Cristian Făciu à l'invitation de l'Université Paul Verlaine - Metz. Ainsi pour l'année 2009, il faut mentionner les activités suivantes :

- Visite de Cristian Făciu à Metz du 22 janvier au 20 février 2009 à l'invitation de l'Université de Metz. Activité de recherche avec Alain Molinari sur la thématique : Modélisation de la dynamique de l'impact - applications aux matériaux qui peuvent subir des transformations de phase. Les résultats obtenus sont résumés en bas et sont en cours de rédaction **(b)**.

- Conférence de Cristian Făciu au Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux, FRE 3236, Metz, 29 janvier, 2009, intitulée
Propagation des ondes et phénomènes de nucléation dans les fils en alliage à mémoire de forme

Synthèse des résultats :

a) Au cours de la visite de Sébastien Mercier à IMAR a été démarrée la collaboration sur la thématique "Modélisation de la dynamique de l'impact - **application à l'écaillage**". Ce problème a été considéré par les participants aux projets et a conduit à des publications internationales [4,5,6]. Au point de vue mécanique, cette thématique peut être envisagée au travers de l'essai de plaque sur plaque en étudiant la propagation des ondes de choc. 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. Le profil de vitesse mesurée en face arrière est fortement lié aux couplages entre propagation des ondes dans la cible et endommagement. Au point de vue mathématique, cette analyse concerne l'étude de certains problèmes aux conditions initiales et aux limites pour des systèmes hyperboliques.

Dans un premier temps, nous avons considéré le matériau comme ayant un comportement élasto-plastique. En supposant que le matériau se rompt à une contrainte seuil, il a été possible de retrouver, par un formalisme faisant intervenir les problèmes de Goursat et de Riemann, les formules classiques de la littérature (formule acoustique, de Stepanov, de Novikov [7]). Il a été montré que ces formules ont été établies dans un cadre simplifié, en négligeant un grand nombre d'interaction d'ondes. Nous avons repris le problème de manière rigoureuse. Il nous paraît envisageable de proposer une solution exacte du problème de plaque-plaque dans le cas de matériaux élasto-plastiques non endommageables. Le traitement des interactions multiples entre front d'ondes plastique et élastique a été obtenu théoriquement. Mais le grand nombre d'interactions conduit à une solution difficilement utilisable en pratique. Des approximations devront être faites et validées, par confrontation numérique.

Lorsque le choc devient intense, un endommagement localisé se développe au sein de la cible, sous la forme de cavités. L'évolution de la vitesse de face arrière de la cible est fortement lié au développement de cet endommagement. Une première étape de prise en compte de cet endommagement a été de considérer le matériau élasto-plastique, présentant un adoucissement à partir d'un certain seuil. La résolution analytique des problèmes de Goursat et Riemann n'est plus possible en présence d'adoucissement. Une résolution numérique est envisagée avec adoption d'une régularisation

visqueuse. Cette seconde étape n'a pu être terminée lors du séjour de Sébastien Mercier.

La reconduite du projet en 2010 permettrait de poursuivre les deux axes :

- Résolution exacte de l'impact de plaque-plaque pour les matériaux élasto-plastiques.
- Prise en compte d'un adoucissement dans le comportement des matériaux. Résolution numérique.

b) Au cours de la visite de Cristian Făciu au LPMM a été continuée la collaboration avec Alain Molinari sur la thématique "Modélisation de la dynamique de l'impact - **applications aux matériaux qui peuvent subir des transformations de phase**". Ce problème a été déjà considéré par les participants aux projets et les résultats publiés dans [1,2,3]. Dans les articles [1], on a proposé l'impact longitudinal des barres comme moyen pour comprendre la cinétique de la transformation de phases induites d'une manière mécanique. Ce problème a été étudié dans un cadre unidimensionnel et isotherme et a fourni d'importants résultats sur la structure des ondes. Puisque les effets thermiques sont très importants pendant une transformation de phase, nous avons pris en considération leur influence sur la propagation des ondes. Pour décrire le comportement d'un matériau qui peut subir un changement de phase nous utilisons, comme souvent dans la littérature, une relation explicite contrainte-déformation non-monotone dépendante de la température $\sigma = \sigma_{eq}(\varepsilon, \theta)$. D'autre part, nous considérons une approche de type différentielle $\dot{\sigma} - E\dot{\varepsilon} = -\frac{E}{\mu}(\sigma - \sigma_{eq}(\varepsilon, \theta))$, $E = const. > 0$, $\mu = const. > 0$ où l'équilibre est décrit par cette même relation. Les paramètres du modèle ont été déterminés à partir d'essais sur des alliages à mémoire de forme quasi-équiatomiques NiTi.

Pour le modèle thermo-élastique dans le cas adiabatique nous avons à considérer un système de type loi de conservation mixte hyperbolique-elliptique. Pour la régularisation visqueuse du modèle nous avons à considérer un système strictement hyperbolique avec sources.

Les résultats obtenus concernent trois directions :

1) L'analyse des ondes progressives pour le modèle de type différentiel qui fournit un critère d'admissibilité pour les ondes de choc et pour les interfaces. On a montré que ces discontinuités admissibles sont des chocs classiques compressifs obéissant au critère entropique de Lax. Le rôle de la viscosité et de la conductivité thermique dans la structure d'une discontinuité (choc ou interface) a été étudié.

2) Pour le système adiabatique thermoélastique - la solution de problèmes de Riemann et Goursat a été obtenue.

3) Pour le système adiabatique thermoélastique - l'étude numérique des solutions aux problèmes initiales et aux limites correspondant aux différentes interactions dynamiques a été proposée.

La rédaction des résultats est dans une phase avancée. Elle nécessite des discussions entre Cristian Făciu et Alain Molinari. Par conséquent, la reconduite du projet

pour l'année 2010 est nécessaire pour finaliser aussi cette partie.

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 21st Century", Proceedings of the 21st 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] 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).
- [5] 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).
- [6] A. Molinari, S. Mercier, *Micromechanical modelling of porous materials under dynamic loading*, J. Mech. Phys. Solids 49, 1497-1516, (2001).
- [7] T. Antoun, L. Seaman, D.R. Curran, G.I. Kanel, S.V. Razorenov, A. V. Utkin, *Spall Fracture*, Springer, (2003).

Visites envisagées pour 2010 :

Puisque Cristian Făciu est invité à nouveau à l'Université de Metz au cours de cette année pour un mois, nous envisageons et proposons **deux visites à Bucarest côté français**.

Financement demandé au LEA pour 2010 :

- Transport pour deux voyages aller-retour Metz - Bucarest.
- Frais d'hébergement et perdiem pour 6 semaines de séjour à Bucarest.