

Projet de Recherche

1. Titre : Modélisation du comportement sous choc des matériaux à changement de phase ou en présence d'endommagement ductile.

2. Participants :

- Cristian Făciu - Institut de Mathématiques "Simion Stoilow" de l'Académie Roumaine (IMAR)
- Alain Molinari - Université de Lorraine, Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3), Labex DAMAS - UMR CNRS 7239
- Sébastien Mercier - Université de Lorraine, Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3) - UMR CNRS 7239

3. Description du projet : Ce projet est une continuation du projet "*Modélisation de la dynamique de l'impact. Applications aux matériaux qui peuvent subir des transformations de phase ou phénomènes d'écaillage*" proposé et développé, dans le cadre du Laboratoire Européen Associé CNRS Franco-Roumain – Mathématiques & Modélisation, pendant la période 2009 – 2010. Il s'est concrétisé par des publications communes et communications aux réunions scientifiques :

1. C. Făciu, A. Molinari : *The structure of shock and interphase layers for a heat conducting Maxwellian rate-type approach to solid-solid phase transitions. Part I : thermodynamics and admissibility*, Acta Mechanica 224(11), 2577 – 2610 (2013)
2. C. Făciu, A. Molinari : *The structure of shock and interphase layers for a heat conducting Maxwellian rate-type approach to solid-solid phase transitions. Part II : numerical study for an SMA model*, Acta Mechanica 224(9), 1917 – 1941 (2013)
3. C. Făciu, A. Molinari : *On the structure of impact induced interphase layers - a heat conducting Maxwellian rate-type approach to solid-solid phase transitions*, 8th European Solid Mechanics Conference, Graz, Autriche, juillet 9-13, 2012.
4. C. Czarnota, N. Jacques, S. Mercier, A. Molinari, C. Făciu : *Spall fracture prediction based on a multi-scale approach for the behavior of porous ductile materials accounting for microinertia*, International Conference on Dynamic Fracture of Ductile Materials (DYMAT 23rd Technical Meeting), Trondheim, Norvège, 12-14 septembre 2017.

L'intérêt scientifique commun des chercheurs participants converge vers la modélisation mathématique et physique du comportement aux sollicitations sous choc de certaines classes de matériaux.

a) Milieux à changement de phases dont font partie les alliages à mémoire de forme.

La recherche effectuée en [1-2] a relié des aspects mathématiques, thermodynamiques et expérimentaux et a permis la description de la structure des ondes qui accompagnent la transformation de phase directe et inverse dans les alliages à mémoire de forme. On a considéré d'une part un modèle thermo-élastique avec énergie libre non-convexe (système EDP mixte hyperbolique-elliptique) et d'autre part une régularisation de type différentiel (système strictement hyperbolique avec sources). On a montré que les discontinuités admissibles pour le système adiabatique thermo-élastique sont des chocs classiques 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.

Les résultats obtenus dans les articles [1-2] permettent maintenant de :

- résoudre les problèmes de Riemann et Goursat pour le système thermo-élastique
- construire un schéma numérique de type Godunov
- étudier numériquement des solutions aux problèmes à valeurs initiales et aux limites correspondant aux différentes interactions dynamiques
- analyser l'influence du champ thermique sur la propagation des ondes instantanées, différées et sur la nucleation des frontières de phase.

On envisage d'étudier l'impact entre deux barres minces (projectile et cible) constituées de matériaux pouvant subir un changement de phase. Ce problème a été utilisé, dans le cas isotherme, comme un moyen d'analyser la cinétique de la transformation de phase et s'est concrétisé par les deux publications suivantes :

5. C. Făciu, A. Molinari : *On the longitudinal impact of two phase transforming bars. Elastic versus a rate-type approach. Part I : The elastic case*, International Journal of Solids and Structures, 43, 497 – 522, (2006).
6. C. Făciu, A. Molinari : *On the longitudinal impact of two phase transforming bars. Elastic versus a rate-type approach. Part II : The rate-type case*, International Journal of Solids and Structures, 43, 523 – 550, (2006).

En utilisant les résultats obtenus en [1-2] nous pouvons étendre l'étude effectuée en [5-6] en prenant en compte les effets thermiques qui accompagnent les changements de phase dynamiques.

b) Matériaux métalliques à endommagement ductile tel que le tantale

Au cours d'expériences d'impact de plaques métalliques à grande vitesse (typiquement un ordre de grandeur seulement en dessous de la célérité des ondes acoustiques du matériau), la cible subit un endommagement ductile par nucléation, croissance et coalescence de pores qui conduit à sa rupture par écaillage. La modélisation de ce phénomène est une direction de recherche dans laquelle le LEM3 a une importante expertise (voir par exemple [7-9])

7. A. Molinari, S. Mercier, *Micromechanical modelling of porous materials under dynamic loading*, J. Mech. Phys. Solids 49, 1497-1516, (2001).
8. 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).
9. 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).

Cette direction de recherche est étroitement liée à la première, car l'origine physique de ce phénomène est intimement liée à la mécanique des ondes de choc. En effet, 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. Le profil de vitesse en face arrière mesuré est fortement lié aux couplages entre propagation des ondes dans la cible et endommagement. Notre but est d'étudier l'atténuation des ondes en présence d'endommagement et de pouvoir mieux prédire les contraintes d'écaillage dans les matériaux ductiles.

Dans un premier temps, nous allons considérer le matériau comme ayant un comportement élasto-plastique. En supposant que le matériau se rompt à une contrainte seuil, il est 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).

Une deuxième étape de prise en compte de cet endommagement est 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 élasto-visco-plastique.

La troisième étape est d'illustrer comment la contribution de la micro-inertie, intégrée dans l'approche constitutive d'un milieu métallique poreux, développée en [7-9], modifie d'une manière significative la contrainte d'écaillage.