

# JOURNÉES DU GROUPE DE TRAVAIL MÉCADYMAT

27-28 mars 2019

Bordeaux

France

# Table des matières

Fissures rapides dans les polymères fragiles : structure et organisation des mécanismes élémentaires aux échelles micro/mesoscopiques, Daniel Bonamy [et al.] . . .	3
Rupture dynamique des matériaux hyper-fragiles : application au polyamide 11, Jean-Benoit Kopp [et al.] . . . . .	4
Unsteady dynamic crack growth in elastomer membranes: energetic analysis from full-field measurements, Thomas Corre [et al.] . . . . .	5
Use of high-speed imaging and the grid method for characterizing the force-displacement response in bi-axial impact test on composite materials, Bratislav Lukic [et al.] . . . . .	7
Mesure par thermographie infrarouge de l'influence de la vitesse sur l'endommagement diffus dans les matériaux composites, Fabien Coussa [et al.] . . . . .	8
Effet Payne : Modèle Viscoélastique Basé sur l'Identification d'un Spectre Continu, Dimitri Jalocha . . . . .	9
Le schéma de Lax-Wendroff pour les solides élastoplastiques, Thomas Heuze . . .	10
An Accurate SPH Scheme for Dynamic Fragmentation Modelling, A Collé . . . .	11
Characterization and modelling of the thermomechanical behavior of a high strength steel subjected to perforation, Pierre Simon [et al.] . . . . .	12
Modélisation numérique de la formation d'un projectile formé par explosion (EFP) avec Europlexus, Léonard Antoinat [et al.] . . . . .	14
Dynamic damage and fracture of a HMX-based PBX, Didier Picart [et al.] . . . .	15
Characterization of ballistic response of an armor ceramic material: experimental tests and numerical modelling, Hakim Abdulhamid . . . . .	16
Présentation de simulations numériques en dynamique rapide réalisées par EDF R&D, Léonard Antoinat [et al.] . . . . .	17

Characterization and constitutive modelling of thermo-mechanical behaviour of an epoxy resin from low to high strain rates, Nadia Bahlouli [et al.] . . . . .	18
Comportement dynamique multiaxial de matériaux cellulaires issus de fabrication additive pour l'allègement structural et la sécurité au crash impact, Hugo Carassus	19
CARACTÉRISATION DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE EN DYNAMIQUE RAPIDE POUR LES POUDRES UTILISÉES EN COLD SPRAY, Hugo Durand [et al.] . . . . .	21
COMPORTEMENT DE QUELQUES TISSUS HUMAINS SOUS SOLLICITATIONS DYNAMIQUES, Agnès Drochon . . . . .	23
<b>Liste des auteurs</b>	<b>24</b>

# Fissures rapides dans les polymères fragiles : structure et organisation des mécanismes élémentaires aux échelles micro/mesoscopiques

Daniel Bonamy \* <sup>1</sup>, Alizée Dubois <sup>1</sup>, Claudia Guerra <sup>1</sup>, Davy Dalmas <sup>2</sup>,  
Julien Scheibert <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Service de physique de l'état condensé – CEA, CNRS : UMR3680 – France

<sup>2</sup> Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes – Ecole Centrale de Lyon, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint Etienne, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR5513 – France

La propagation de fissures est le mécanisme fondamental responsable de la rupture catastrophique des matériaux fragiles. La Mécanique Linéaire Elastique de la Rupture (MLER) fournit un cadre théorique prédictif et performant pour en décrire la dynamique. Néanmoins, lorsque la vitesse de fissuration devient importante, certaines instabilités sont observées sur la dynamique locale, donnant lieu à des fluctuations de vitesse conséquentes, et celles-ci sont, par essence, incompatibles avec l'approche continue de la MLER. Pour mieux comprendre ces mécanismes, nous avons mené une série d'expériences sur la rupture dynamique du Polyméthylméthacrylate (PMMA). Dans ce matériau en effet et au-delà d'une certaine vitesse seuil, la propagation des fissures va de pair avec la formation de nombreuses microfissures qui laissent des traces caractéristiques, coniques, sur les surfaces de fracture. Et en analysant celles-ci post-mortem, il est possible de reconstruire entièrement la dynamique spatio-temporelle de fissuration, aux échelles du micromètre et de la nanoseconde ! Au cours de cette présentation, nous verrons comment la dynamique collective des microfissures fait émerger, aux échelles mésoscopiques, une dynamique de croissance particulière pour la ligne de fracture effective. Nous verrons ensuite comment ces événements de microfissuration s'organisent eux-mêmes à plus haute vitesse. Nous discuterons finalement des liens possibles entre ces microfissures et les instabilités de microbranchement observés à plus haute vitesse.

---

\*Intervenant

# Rupture dynamique des matériaux hyper-fragiles : application au polyamide 11

Jean-Benoit Kopp \* <sup>1</sup>, Jérémie Girardot <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M) – Université de Bordeaux, Arts et Métiers  
ParisTech, Institut polytechnique de Bordeaux, Centre National de la Recherche Scientifique :  
UMR5295, Arts et Métiers Paris Tech – Site ENSCBP Bât A 16 avenue Pey-Berland 33607 Pessac  
Cedex, France

<sup>2</sup> Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M) – Institut polytechnique de Bordeaux, Arts  
et Métiers ParisTech, CNRS : UMR5295, Université de Bordeaux – Site ENSCBP Bât A 16 avenue  
Pey-Berland 33607 Pessac Cedex, France

Rupture dynamique des matériaux hyper-fragiles : application au polyamide 11

# Unsteady dynamic crack growth in elastomer membranes: energetic analysis from full-field measurements

Thomas Corre \* <sup>1</sup>, Michel Coret <sup>2</sup>, Erwan Verron <sup>3</sup>, Bruno Leblé <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM) – Université de Nantes, Ecole Centrale de Nantes, CNRS : UMR6183 – 1, rue de la Noë BP92101 44321 Nantes cedex 3, France

<sup>2</sup> Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM) – Université de Nantes, Ecole Centrale de Nantes, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR6183 – 1, rue de la Noë BP92101 44321 Nantes cedex 3, France

<sup>3</sup> Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM) – Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, CNRS : UMR6183 – 1, rue de la Noë BP92101 44321 Nantes cedex 3, France

<sup>4</sup> NAVAL Group Research - Technocampus Ocean – Naval Group Research – rue de l'Halbranne, Bouguenais, France

The issue of dynamic fracture of an elastomer membrane from an experimental point of view is considered here. The aim is to provide some insight to predict the speed of cracks in highly stretched membranes.

An experimental procedure involving two cameras is developed in order to perform full-field measurements based on digital image correlation during crack propagation. This set-up permits to retrieve the material configurations of the sample all along crack growth, which is a crucial step toward a complete mechanical analysis of the problem. In addition to the kinematic fields, both strain energy density and stress fields are estimated thanks to a hyperelastic model.

Tested with polyurethane, rapid crack growth has been observed, even reaching the intersonic regime [1] for large prescribed deformations of the membrane. The crack kinematics are observed in both deformed and reference configurations. In particular, the analysis of unsteady crack growth close to the edges of the sample underlines the importance of working in the reference configuration for large strain and dynamic fracture problems.

The method proposed allows to compute the kinetic and stored strain energy density fields along crack growth. Therefore, the total mechanical energy can be estimated through integration over the whole sample. With the instantaneous crack speed in the reference configuration, the energy release rate can be estimated all along unsteady crack growth from its global definition. This energetic analysis confirms the role of the energy release rate as a quantity independent of crack acceleration. The master curve, which is usually obtained with steady-state experiments [2], is retrieved in a continuous way. However, its role as a driving quantity might be discussed at high crack speed as our kinematic results suggest a change in the scale of the driving quantities [3] in the intersonic regime.

## References

P. Petersan, R. Deegan, M. Marder, H. Swinney. Cracks in rubber under tension exceed the shear wave speed. *Phy. Rev. Lett.* (2004) 93,015504.

---

\*Intervenant

G.J. Lake, C.C. Lawrence, and A.G. Thomas. High-Speed Fracture of Elastomers: Part I Rubber Chemistry and Technology, 73(5) (2000) 801-817.

CH. Chen, HP. Zang, J. Niemczura, K. Ravi-Chandar and M. Marder. Scaling of crack propagation in rubber sheets Europhysics Letters, 96(3) (2011) 36009.

# Use of high-speed imaging and the grid method for characterizing the force-displacement response in bi-axial impact test on composite materials

Bratislav Lukic \* <sup>1</sup>, Pascal Forquin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Grenoble-Alpes – 3SR, CNRS UMR 5521 – France

Composite materials have been widely used in engineering applications that consist of dynamic loading conditions such as in aerospace and automotive industry. Recently, these materials have also been proposed in lightweight armor solutions which has led to an increased research interest in understanding their impact response. In this work an experimental configuration is developed to investigate the bi-axial bending response of composite material under low-velocity impact of a large cylindrical projectile. A methodology is set in order to probe the possibility of utilizing high-speed imaging and the grid method to measure the time-resolved acceleration fields close to the impact surface of the cylindrical projectile. In that case, the acceleration fields provide direct access to the force measurement acting as a dynamic load cell. The laser interferometer pointed towards the back end of the tested sample allows measuring the displacement throughout the test which, with the force measurement, provides access to the force-displacement curve. Several first results regarding two sizes of samples will be presented focusing along the way on the experimental methodology applied.

---

\*Intervenant

# Mesure par thermographie infrarouge de l'influence de la vitesse sur l'endommagement diffus dans les matériaux composites

Fabien Coussa \* <sup>1</sup>, Julien Berthe <sup>2</sup>, Matthieu Ragonet <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Onera - The French Aerospace Lab – DMAS ONERA – France

<sup>2</sup> Onera - The French Aerospace Lab (Lille) – ONERA – F-59045 Lille, France

Dans la gamme des vitesses lentes et quasi-statiques, la mesure de la densité de fissuration dans les matériaux composites stratifiés croisés a fait l'objet de nombreuses études. La plupart de ces techniques ont été utilisées dans le cadre de sollicitations cyclées où l'interruption de l'essai permet d'observer et de mesurer les mécanismes de dégradation du matériau au cours du chargement. Dans la gamme des vitesses dynamiques, le recours à de tels protocoles reste toutefois limité à cause de l'asservissement en boucle ouverte des moyens dynamiques. Dans ces travaux, afin de mesurer l'influence sur la cinétique de fissuration de l'augmentation de la vitesse vers des plages dynamiques, une technique de mesure non-intrusive par thermographie infrarouge (IR) est utilisée. Cette approche a notamment pu être utilisée pour mesurer l'évolution du dommage dans les composites soumis à des chargements statiques [1], de fatigues [2] et plus récemment à des chargements aux vitesses dynamiques intermédiaires [3]. Néanmoins, la détection et la quantification par thermographie IR de fissures transverses pour des chargements dynamiques restent encore peu étudiées dans la littérature du fait des limitations liées à la fréquence d'acquisition des caméras IR d'ancienne génération. Ces travaux proposent ainsi d'étendre l'analyse réalisée à basses vitesses dans les travaux de [4] à des vitesses de sollicitations dynamiques, par le biais de l'utilisation d'une caméra IR haute cadence (Telops FAST M3K). L'intérêt de la démarche présentée est double. Suivant un large spectre de vitesses de déformation, l'objectif est d'étudier l'évolution de la densité et de la dissipation calorifique du phénomène de fissuration transverse en fonction de l'augmentation de la vitesse de sollicitation et de l'épaisseur des échantillons. Le matériau de l'étude est un composite stratifié croisé carbone epoxy T700/M21 pour lequel l'influence de l'épaisseur sur la sensibilité à la vitesse est étudiée en faisant varier la séquence d'empilement ([0/90]s, [0/902]s et [0/903]s). L'ensemble des essais est réalisé à l'aide d'un vérin servohydraulique, sur des échantillons d'une longueur utile définie à 40 mm permettant de solliciter le matériau à des vitesses de déformation situées entre  $E = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  et  $101 \text{ s}^{-1}$ . Afin de minimiser la résolution spatiale et de maximiser la fréquence d'acquisition pour les hautes vitesses, le suivi de l'apparition du phénomène de fissuration transverse est réalisé uniquement suivant la tranche des échantillons testés. L'hypothèse associée à l'instantanéité de la propagation de fissure au travers de l'échantillon a pour cela été vérifiée à l'aide d'une méthode quantitative de suivi de la température suivant la largeur des éprouvettes (Figure 1(a)). Les premières tendances expérimentales préfigurent d'une relative insensibilité à la vitesse de la densité et de la cinétique de fissuration dans la gamme des basses vitesses pour la configuration [0/903]s (Figure 1(b)). Les analyses sont en cours de réalisation concernant les plus hautes vitesses et les différentes stratifications.

---

\*Intervenant

# Effet Payne : Modèle Viscoélastique Basé sur l'Identification d'un Spectre Continu

Dimitri Jalocha \* <sup>1</sup>

<sup>1</sup> CEA CESTA – CEA, DAM, CESTA, Le Barp, France – France

L'effet Payne est une non-linéarité du comportement viscoélastique des élastomères chargés en régime dynamique vibratoire. La rigidité du matériau chute en fonction de l'amplitude dynamique de la sollicitation. Il existe quelques lois de comportement viscoélastique modélisant ce phénomène dans la littérature [1], mais les paramètres restent souvent difficiles à identifier. La nouveauté présentée ici est une loi non-linéaire permettant de reproduire cet effet, qui repose sur l'évolution d'un seul paramètre, facilement identifiable.

---

\*Intervenant

# Le schéma de Lax-Wendroff pour les solides élastoplastiques

Thomas Heuze \* <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM) – Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, CNRS : UMR6183 – 1, rue de la Noë BP92101 44321 Nantes cedex 3, France

On présente dans ce travail une extension du schéma de Lax-Wendroff pour le calcul en dynamique rapide de la réponse des solides élastoplastiques. Deux formulations basées sur ce schéma sont ici proposées, pour lesquelles soit les composantes de la déformation soit celles des contraintes sont incluses dans le vecteur des inconnues en plus des composantes de la vitesse. Le schéma est ici présenté dans sa version à deux étapes (dite de Richtmyer), permettant de projeter deux fois par pas de temps les contraintes prédites élastiquement sur la surface de charge. Ceci permet de diminuer le nombre de cellules nécessaires pour l'approximation des ondes plastiques discontinues, par rapport à des stratégies plus classiques ne comportant qu'une projection simple a posteriori sur le critère. Des simulations sont conduites sur des cas tests unidimensionnel et bidimensionnel, et des comparaisons avec des solutions analytiques ou obtenues par éléments finis montrent des résultats satisfaisants.

---

\*Intervenant

# An Accurate SPH Scheme for Dynamic Fragmentation Modelling

A Collé \* <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut de mathématique de toulouse – Université Paul Sabatier [UPS] - Toulouse III, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse – France

In Aeronautics, Defense and Space, the dynamic fragmentation is induced by extreme loadings involved in events as hail impact, hypervelocity impact, terminal ballistics or also warhead fragmentation. Lagrangian finite element methods are classically used to handle the numerical modeling of these events. They propose to reproduce the material failure process thanks to mesh opening techniques. However, these approaches induce very long computation times and experience severe energy conservation issues, whereas it is crucial in this framework. We focus on the meshless method called Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Based on a set of moving interpolation points, it disregards any connectivity between its elements which makes it naturally well suited to handle material failure. Nevertheless, SPH schemes suffer from well-known instabilities questioning their accuracy and activating nonphysical processes, as numerical fragmentation. We propose then a new robust SPH scheme called  $\gamma$ -SPH-ALE. Firstly applied to Euler equations, it is secondly extended to the solid dynamics. It is built on Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) considerations and includes a stabilizing Low-Mach Scheme inherited from the finite volume framework. A nonlinear stability analysis highlights CFL-like conditions on the scheme parameters. A strong mathematical background is then built ensuring the scheme conservativity, robustness, stability and consistency. Finally, the implementation of  $\gamma$ -SPH-ALE on several academic fragmentation test cases reveals that the proposed scheme increases both stability and accuracy. Particularly, it manages to prevent spurious oscillations to appear in elastic waves, and to solve the so-called tensile instability. Taking advantage of GPU computing, such results are achieved in reduced computation times with respect to classical CPU implementations. These developments are the first steps through a reliable meshless framework for fragmentation modeling as illustrated on an Electromagnetic Compression tests (Fig.1).

---

\*Intervenant

# Characterization and modelling of the thermomechanical behavior of a high strength steel subjected to perforation

Pierre Simon <sup>1,2</sup>, Yael Demarty \* <sup>3</sup>, Alexis Rusinek <sup>2</sup>

<sup>1</sup> French-German research institute of Saint-Louis, 5 rue du general Cassagnou – Institut Franco-allemand de recherches de Saint Louis – France

<sup>2</sup> LEM3 – Université de Lorraine - LEM3 (UMR7239) – France

<sup>3</sup> French-German research institute of Saint-Louis, 5 rue du general Cassagnou – Institut Franco-allemande de Recherches de Saint Louis – France

Current needs in the design and optimization of complex ballistic protection structures lead to the development of more and more accurate numerical modelling for high impact velocity. The aim of developing such a tool is to be able to predict the protection performance of structures using few experiments. Considering only numerical approach, the most important issue to have a reliable simulation is to focus on the material behaviour description in term of constitutive relation and failure model at high strain rates, large range of temperatures and complex stress states. In this context, the present work deals with the study of the dynamic response of an armour steel subjected to an impact loading. For this application, the material can undergo both quasi-static and dynamic loading and is sustaining to an increase of temperature due to the self-heating related to plastic deformation as for example during perforation.

Mechanical characterization based on compression experiments has been performed to study the material mechanical behaviour over a wide range of strain rates varying from to and different initial temperature ( to ). These experiments highlighted the strong non linearity of the strain rate sensitivity of the material used. Moreover, a temperature increase is observed during dynamic loading, inducing a thermal softening of the material. Thus, the temperature sensitivity has been defined for both quasi-static and dynamic conditions.

Parameters of several constitutive relations like the Johnson-Cook (JC) model [1] or the Voyiadjis-Abed (VA) model [2] have been identified to describe the observed thermomechanical behaviour. In order to mimic experiments and to improve the high strain rate sensitivity observed experimentally, a new formulation of the VA model has been developed [3].

In addition, perforation experiments using a conical shape projectile have been performed to assess the validity of the identified models discussed previously. These tests have been conducted at room and at low ( temperatures. These experiments allowed to determine the ballistic limit velocity and residual velocity . The numerical simulations have been done using both the JC constitutive relation and the mixed VA model. The numerical results have been used to compare the efficiency of both models. Moreover, the failure strain level has been estimated using an inverse method based on perforation tests. A good correlation is obtained between numerical and experimental results, with an improved accuracy provided by the mixed VA model.

---

\*Intervenant

G. R. Johnson and W. H. Cook, "A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates and high temperatures," in *7th International Symposium on Ballistics*, 1983.

G. Z. Voyiadjis and F. H. Abed, "Microstructural based models for bcc and fcc metals with temperature and strain rate dependency," *Mech. Mater.*, vol. 37, pp. 355–378, 2005.

P. Simon, Y. Demarty, A. Rusinek, and G. Z. Voyiadjis, "Material Behavior Description for a Large Range of Strain Rates from Low to High Temperatures: Application to High Strength Steel," *Metals (Basel)*., vol. 8, p. 795, 2018.

# Modélisation numérique de la formation d'un projectile formé par explosion (EFP) avec Europlexus

Léonard Antoinat <sup>\* 1</sup>, E. C. J. Gan <sup>2</sup>, Alex Remennikov <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centre for Infrastructure Protection and Mining Safety, University of Wollongong, – Australie

<sup>2</sup> Faculty of Engineering and Information Sciences, University of Wollongong, Wollongong – Australie

<sup>3</sup> University of Wollongong (UOW) – School of Civil, Mining and Environmental Engineering,  
University of Wollongong, Wollongong NSW 2502, Australie

La protection civile, et particulièrement celle des bâtiments, est un des grands enjeux des années à venir. Cela est la conséquence d'une augmentation des actes de malveillance. Dans ce cadre, l'équipe de recherche en dynamique rapide de l'université de Wollongong (Australie) travaille depuis plusieurs années par une approche expérimentale et numérique, aux conséquences d'explosions. Remmenikov a notamment étudié la déformation d'une plaque en acier soumis à l'explosion de nitrométhane [1]. Plus récemment, il s'est intéressé à la formation d'un projectile formé par explosion (EFP en anglais) et sa pénétration dans une structure sandwich composée de plaques d'acier et d'un bloc de béton [2].

L'objet de la présentation est l'analyse d'une configuration de projectile formé par explosions (EFP) a simulée à l'aide du code Europlexus. Elle est composée d'un tube cylindrique remplie d'explosif en composition B et d'une plaque en cuivre incurvée. La simulation est réalisée en utilisant le code Europlexus et notamment la méthode d'interaction fluide-structure des frontières immergées permettant de coupler éléments finis et volumes finis.

Le scénario de formation d'EFP suivant est numériquement observé :

1. A partir du point d'initiation, dans l'explosif, une onde de pression se propage et vient atteindre le centre de la plaque en cuivre incurvée.
2. Le centre de la plaque se déforme. Sa forme incurvée devient alors inversée.
3. La plaque prend la forme d'un projectile qui se déforme et se coupe en deux. La partie de nez se stabilise alors autour d'une vitesse balistique (à 1077 m/s dans notre simulation).
4. Références

A. Remennikov, T. Ngo, B. Uy, M. Netherton et D. Mohotti, "Experimental investigation and simplified modeling of response of steel plates subjected to close-in blast loading from spherical liquid explosive charges," *International Journal of Impact Engineering*, 2017.

A. Remennikov, E. C. J., T. Ngo et M. Netherton, "The development and ballistic performance of protective steel-concrete composite barriers against hypervelocity impacts by explosively formed projectiles," *Composite Structures*, 2018.

---

\*Intervenant

# Dynamic damage and fracture of a HMX-based PBX

Didier Picart \* <sup>1</sup>, Patrice Bailly <sup>2</sup>, Jérôme Vial , Kevin Serafin

<sup>1</sup> CEA Le Ripault – CEA – France

<sup>2</sup> Laboratoire LaMé, Insa Centre val de Loire, Bourges – Institut National des Sciences Appliquées (INSA) – France

The French Commission for Atomic and Alternative Energies is interested in the prediction of the ignition of energetic materials that experience low velocity impacts. The ignition mechanism for such loadings is described as non-shock ignition and is localized at the structure micro scale. Among the attempts to explain such ignition, the micro cracks friction is suspected. At the structure scale, continuum damage mechanics in dynamics is well appropriated to model the problem. However, one of the major difficulties in the numerical simulation of damage is due to the localization phenomenon.

In the experimental part of the study, a reversed edge-on impact test has been developed to obtain an initial view of the microstructure (large crystals embedded in a "dirty binder") and real-time and post-mortem observations of the deformation of the microstructure when submitted to static or dynamic loadings [1-2]. Images highlight the behavior of the matrix/grain interface. Decohesion is observed without tangential friction and hot spot formation is thus excluded in these interfaces. Depending on the loading conditions (for example of the confinement), the stiffness of the matrix evolves and plasticity and microcracking can be observed into the larger crystals. The location and the possible hot spot formation mechanisms will be discussed.

J. Vial, D. Picart, P. Bailly, F. Delvare, Numerical and experimental study of the plasticity of HMX during a reverse edge\_on impact test, Modelling, Simul. Mater. Sci. Eng. 21, 045006, 2013.

K. Serafin, D. Picart, P. Bailly, Development of an impact test to study the hot spot formation in PBX, in NTREM 2017, Pardubice.

---

\*Intervenant

# Characterization of ballistic response of an armor ceramic material: experimental tests and numerical modelling

Hakim Abdulhamid \* <sup>1</sup>

<sup>1</sup> THIOT INGENIERIE – THIOT INGENIERIE – Route Nationale 46130 Puybrun, France

This paper presents an approach for the investigation of mechanical behavior of a ceramic material under dynamic loadings. The methodology combines information from mechanical tests and numerical simulations to identify the properties of the material in intact and damaged states. Complementary data on the mechanical response under high strain rates of the ceramic is gathered from tests on light gas gun and Split Hopkinson Pressure Bars (SHPB). Firstly, Hugoniot and spall parameters are identified using plate impact tests. Secondly, dynamic compression tests on SHPB are performed on confined specimens to analyze the effects of pressure on the damaged strength of the ceramic. Third, ballistic impacts of projectile on metal-backed ceramic tile are performed to measure its strength in a typical shield application. Experimental data is then used to calibrate a Johnson-Holmquist (JH-2) model. Comparisons between experiments and calculations highlight the relative importance of the model parameters in such typical ballistic applications. Also, this work shows the limit of the JH-2 model for the simulation of ceramic mechanical behavior.

---

\*Intervenant

# Présentation de simulations numériques en dynamique rapide réalisées par EDF R&D

Léonard Antoinat \* <sup>1</sup>, Pauline Manhes <sup>2</sup>

<sup>1</sup> EDF RD (EDF) – EDF – France

<sup>2</sup> EDF RD – EDF – France

Les phénomènes physiques faisant intervenir des transitoires rapides et brutaux dans les systèmes composés de structures et fluides sont étudiés au sein d'EDF R&D en utilisant le code de dynamique rapide Europlexus (EPX). L'un des objectifs de la R&D est de vérifier et valider ce code sur des essais pour le rendre opérationnel dans simulation de situations accidentels sur des matériels et structures du parc EDF.

Dans le cadre du projet de dynamique rapide FAST, EDF R&D travaille sur la mise en place de modélisations réalistes du comportement très endommagé de bâtiments en béton armé sous chargements de type impact allant jusqu'à la ruine complète. A part les aspects dynamiques rapides, ces modélisations impliquent la prise en compte de non-linéarités géométriques et de matériaux, de contact/autocontact, l'interaction fluide-structure avec appel à la fois aux formulations classiques (éléments finis) et très avancées (SPH). Pour valider ces travaux, il est prévu de simuler une série d'essais instrumentés de crash et d'impact disponibles dans la littérature. Ceux-ci peuvent notamment être des essais de perforations [1] [2] [3], de crash de réservoir rempli de liquide ou d'impact sur eau [4] [3] [5] [6].

En 2019, des simulations ont été réalisées par EDF R&D à l'aide du code de dynamique rapide Europlexus afin de reproduire numériquement des tests unitaires de vérification du code, des validations sur structure à petite échelle (perforation, flambage dynamique, sollicitation d'assemblage) puis à échelle réelle. On se propose ici de présenter l'avancement de ces travaux.

---

\*Intervenant

# Characterization and constitutive modelling of thermo-mechanical behaviour of an epoxy resin from low to high strain rates

Nadia Bahlouli \* <sup>1</sup>, Charles Francart <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (ICube) – université de Strasbourg, CNRS : UMR7357 – 2-4 rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France, France

<sup>2</sup> Laboratoire ICube – université de Strasbourg, CNRS : UMR7357 – France

In order to avoid riveting in multilayer protective armour technologies, the use of interface adhesive bonding is preferred [1, 2]. Indeed, the presence of rivet increases the density of the multilayer material and requires drilling of holes which leads to many other technical and economic issues. The most commonly used adhesive material for such purpose is the epoxy resin. Indeed, the different grades of epoxy resin have been developed, which on the manufacturer, the target usage, the composition of hardening agent and resin etc. In this study, an epoxy resin adapted for multilayer armour bonding has been chosen.

In order to build a predictive numerical model of the thermomechanical multilayer material over a wide range of temperatures and strain rates, it is important to correctly describe the mechanical behaviour of the adhesive. In literature review, the adhesive layer is considered as a null thickness cohesive layer. The work presented in this paper is dedicated to the experimental characterization and the related constitutive modelling of the flow stress of the adhesive material because the resin behaviour plays a role in the ballistic performance of the multilayer armour [3].

Experimental compressive tests have been carried out at various temperatures from 238 K to 343 K and strain rates from 0.001 /s to nearly 18000 /s (Figure 1) using uniaxial testing machine and Split Hopkinson bars [4]. Those results show a complex behaviour exhibiting strong temperature and strain rate sensitivities (Figure 2). Furthermore, its relatively low temperature of glass transition ( $T_g$ ) leads to a transition from glassy state to viscous state during high strain rate loading due to adiabatic heating.

---

\*Intervenant

# Comportement dynamique multiaxial de matériaux cellulaires issus de fabrication additive pour l'allègement structural et la sécurité au crash impact

Hugo Carassus \* <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines - UMR 8201 – Arts et Métiers ParisTech, I2M CNRS UMR 5295 – France

H. Carassus\* \*\*, J.D. Guerin\*, H. Morvan\*, G. Haugou\*, S. Guerard\*\*, E. Markiewicz\*  
\* Univ. Polytechnique Hauts-de-France, CNRS, UMR 8201-LAMIH, F-59313 Valenciennes, France

\*\*Arts et Métiers ParisTech, I2M, CNRS UMR 5295, F-33405 Talence, France

La fabrication additive permet d'envisager la conception de nouveaux matériaux cellulaires combinant légèreté et grande capacité d'absorption d'énergie tels que les structures lattices. Leur utilisation dans les secteurs du transport terrestre ou aérien, revêt alors un intérêt certain pour contribuer conjointement à l'allègement structural et à la sécurité en cas de crash et/ou d'impacts.

Nos travaux sont axés sur des structures issues de la famille des TPMS (Triple Periodic Mean Surface) qui sont inspirées de la nature. Ces matériaux cellulaires sont obtenus à partir d'une fonction niveau qui minimise localement l'aire de la surface pour une condition aux limites donnée. Pour chaque géométrie TPMS, deux types de structures peuvent être conçues avec des propriétés distinctes :

- les squelettes ;
- les feuilles.

Une revue de l'état de l'art montre que cette catégorie de matériaux cellulaires n'a à ce jour été étudiée que sous chargement quasi-statique. Il est proposé ici d'étendre l'analyse de leur comportement mécanique sous chargement dynamique rapide.

Dans un premier temps, une analyse numérique éléments finis est entreprise. Elle s'appuie sur des résultats récemment publiés pour une géométrie de TPMS sollicitée sous chargement quasi-statique (Lei Yang, 2018). Notre approche consiste à bâtir un modèle éléments finis représentatif

---

\*Intervenant

de cette géométrie, de valider sa réponse mécanique sous chargement quasi-statique par comparaison avec les résultats publiés, puis de simuler son comportement sous chargement dynamique et d'analyser les effets de la vitesse sur la réponse à l'effondrement.

Dans un second temps, la direction du chargement est modifiée en combinant les composantes de compression et de cisaillement afin d'analyser si la performance de cette géométrie de TPMS est maintenue sous chargement multiaxial.

#### Bibliographie

Lei Yang, C. Y. (2018). Mechanical response of a triply periodic minimal surface cellular structures manufactured by selective laser melting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 149-157.

# CARACTÉRISATION DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE EN DYNAMIQUE RAPIDE POUR LES POUDRES UTILISÉES EN COLD SPRAY

Hugo Durand \* <sup>1</sup>, Francesco Delloro <sup>2</sup>, Robin Kromer <sup>3</sup>, Michel Jeandin <sup>4</sup>,  
Fabrice Morvan <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Centre des Matériaux (MAT) – Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7633, MINES ParisTech - École nationale supérieure des mines de Paris – France

<sup>2</sup> Centre des Matériaux (MAT) – MINES ParisTech - École nationale supérieure des mines de Paris, PSL Research University, CNRS UMR 7633 – 63-65 rue Henri Auguste Desbrières, BP 87, 91003 Evry Cedex, France

<sup>3</sup> I2M - MPI – Université de Bordeaux, I2M CNRS UMR 5295, Université de Bordeaux, I2M CNRS UMR 5295 – France

<sup>4</sup> Centre des Matériaux (MAT) – MINES ParisTech - École nationale supérieure des mines de Paris, PSL Research University, Centre National de la Recherche Scientifique : UMR7633 – Centre des matériaux P. M. Fourt RN 447 - BP 87 91003 EVRY CEDEX, France

<sup>5</sup> Toyal – Toyal – France

La projection dynamique par gaz froid, " cold spray " en anglais, est un procédé additif permettant de faire des revêtement par empilement successif de particules projetées à haute vitesse (300-1000 ms<sup>-1</sup>) sur un substrat. A l'impact, les particules (à l'état solide) subissent de grandes déformations en régime de dynamique rapide, avec des vitesses de déformation de l'ordre de 10<sup>8</sup> s<sup>-1</sup>. Ce procédé de projection a connu un développement important dans les deux dernières décennies car les propriétés du revêtements étaient très satisfaisantes en termes de densité et il n'y a pas d'altération des propriétés du matériau. Il attire de plus en plus l'intérêt des industriels pour sa versatilité tant dans les applications (fabrication additive, réparation, fonctionnalisation de surface, etc.) que dans les matériaux (poudres de métal, polymère, céramique ou des mélanges). Le comportement mécanique des poudres est un aspect fondamental pour comprendre les mécanismes d'ancrage et de construction des dépôts cold spray et reste encore l'apanage de la simulation numérique, vu l'échelle spatio-temporelle des impacts (dizaine de  $\mu\text{m}$ , dizaine de ns). Des études sont portées sur la compréhension de l'adhésion de la particule au substrat, notamment sur l'effet du cisaillement adiabatique, de la fusion locale ou de l'interaction métallurgique. Cependant ces études s'appuient sur la simulation numérique par éléments finis de l'impact des particules. Cela remonte à connaître la déformation spatiale dans la particule et dans le substrat. Le modèle de Johnson-Cook est le plus couramment utilisé pour modéliser le comportement mécanique en dynamique rapide par éléments finis des particules. Bien qu'il soit adapté aux vitesses de déformation en jeu, les données matériaux utilisées jusqu'à présent ne sont pas appropriées pour le cold spray car issues d'éprouvettes massives et basées sur des essais " barres de Hopkinson ". Dans ces essais, les vitesses de déformation peuvent être jusqu'à mille fois plus faibles qu'en projection dynamique et un effet d'échelle est à prévoir entre des éprouvettes centimétriques et

---

\*Intervenant

des particules micrométriques.

Peu d'étude ont mis au jour une méthodologie afin de déterminer les propriétés intrinsèques en élasticités et en plasticités en quasi-statique et en dynamique. Dans le but d'améliorer la prédictibilité des simulations, cette étude propose un protocole expérimental et numérique pour déterminer les coefficients matériaux du modèle de Johnson-Cook.

Un essai de micro-compression sur une particule permettra de déterminer les coefficients associés au comportement statique. Un essai d'envol de particule par choc laser va être mis au point. Cette technique a déjà démontré la possibilité d'accélérer une particule individuelle à des vitesses proches de celles atteignables en cold spray. Si la particule trouve sur sa trajectoire un substrat, l'essai peut donc être considéré comme une simulation expérimentale du cold spray, où un événement élémentaire (l'impact d'une particule) serait observable. La mesure de la vitesse de la particule et l'analyse de la particule écrasée, en comparaison à la simulation de l'impact dans les mêmes conditions, permettent la détermination des coefficients dynamiques du modèle. Ce protocole original, permettant de caractériser le comportement dynamique des poudres, sera appliqué aux poudres d'aluminium produites par notre partenaire industriel TOYAL (Le Mesnil-le-Roi, France). Il ouvre la possibilité d'étudier l'influence des paramètres physico-chimiques, métallurgiques et morphologiques des poudres, sur leur capacité à se déformer et donc à leur optimisation pour une application donnée. La meilleure compréhension de la construction de dépôt permettra l'utilisation de machines de projection moins puissantes et donc moins onéreuses, ce qui devrait faciliter l'accès du procédé aux petites entreprises.

# COMPORTEMENT DE QUELQUES TISSUS HUMAINS SOUS SOLLICITATIONS DYNAMIQUES

Agnès Drochon \* 1,2

<sup>1</sup> UTC (UMR CNRS 7338) – CNRS : UMR7338 – 60200 Compiègne, France

<sup>2</sup> UMR CNRS 7338 (UTC) – CNRS – 60200 Compiègne, France

Les tissus biologiques sont des matériaux vivants qui possèdent une structure complexe (hétérogènes, anisotropes, ...). Leur comportement mécanique est la plupart du temps non-linéaire et varie d'un individu à l'autre. Ce comportement change aussi lorsqu' une pathologie est présente (par exemple, un foie fibreux, la présence d'une tumeur cancéreuse, une artère rigidifiée par l'athérosclérose, ...). La caractérisation des propriétés mécaniques des tissus peut donc servir à préciser un diagnostic, et de manière plus générale, à comprendre mieux le fonctionnement du corps humain. La meilleure connaissance possible des tissus natifs est indispensable pour pouvoir mettre au point des prothèses ou pour l'ingénierie tissulaire (reconstruction in vitro du tissu dans un but de réparation). Certaines caractéristiques peuvent être obtenues par des méthodes non-invasives (par exemple le module d'Young de l'os, grâce à des méthodes ultra-sonores, ou le module d'Young de la paroi aortique, déduit de mesures par IRM). D'autres mesures sont réalisées in vitro. La question se pose alors de savoir si les conditions du test in vitro reproduisent bien la situation in vivo (influence de l'hydratation, de la température, de la façon avec laquelle l'échantillon a été prélevé, de son volume, de sa conservation, ...). Sachant que, de toute façon, les mesures in vitro ne rendront pas compte de l'influence des tissus qui environnaient l'échantillon lorsqu'il était dans le corps humain. Une catégorie de travaux vise à mesurer des propriétés mécaniques de l'échantillon (viscosité, visco-élasticité, rupture, éclatement, plasticité, fatigue sous des sollicitations répétées, ...). Les tests relèvent du même principe que pour des matériaux non biologiques : rhéométrie, compression, traction, cisaillement, torsion, flexion, tests de fluage ou de relaxation... Une autre catégorie de travaux vise à comprendre comment les contraintes mécaniques (normales,

---

\*Intervenant

tangentielles, cycliques, ...) influencent le comportement des tissus (par exemple, les forces de pression dues à la compacité des cellules dans une tumeur cancéreuse, les mécanismes de remodelage osseux ou de vasodilatation / vasoconstriction des vaisseaux, ...). Comment une cellule transforme-t-elle un signal mécanique en signal biologique ? C'est le domaine de la mécanobiologie ou de la mécanotransduction. Les contraintes mécaniques entraînent des changements de forme, des migrations cellulaires et jouent un rôle dans la différenciation des cellules souches. Les cellules et les tissus à la fois génèrent et perçoivent des contraintes mécaniques et ceci participe aux régulations physiologiques, à la régénération tissulaire et aux dérèglements pathologiques aussi.

# Liste des auteurs

ABDULHAMID, Hakim, 16

antoinat, Léonard, 14, 17

Bahlouli, Nadia, 18

Bailly, Patrice, 15

Berthe, Julien, 8

Bonamy, Daniel, 3

Carassus, Hugo, 19

Collé, A, 11

CORET, Michel, 5

Corre, Thomas, 5

COUSSA, Fabien, 8

Dalmas, Davy, 3

Delloro, Francesco, 21

Demarty, Yael, 12

Drochon, Agnès, 23

Dubois, Alizée, 3

Durand, Hugo, 21

Forquin, Pascal, 7

Francart, Charles, 18

Gan, E. C. J., 14

girardot, jérémie, 4

Guerra, Claudia, 3

Heuze, Thomas, 10

Jalocha, Dimitri, 9

Jeandin, Michel, 21

Kopp, Jean-Benoit, 4

KROMER, Robin, 21

Leblé, Bruno, 5

Lukic, Bratislav, 7

Manhes, Pauline, 17

Morvan, Fabrice, 21

Picart, Didier, 15

Ragonet, Matthieu, 8

Remennikov, Alex, 14

Rusinek, Alexis, 12

scheibert, Julien, 3

Serafin, Kevin, 15

Simon, Pierre, 12

VERRON, Erwan, 5

Vial, Jérôme, 15

