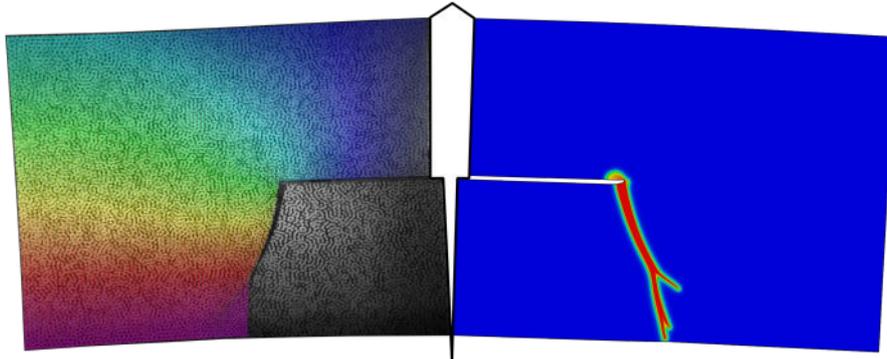


19 - 20 Novembre 2025

Ecole Centrale de Nantes

## Workshop thématique sur la Fragmentation dynamique pour les solides



Entre essais et calculs

La **fragmentation dynamique** correspond à la rupture rapide d'un solide sous sollicitations extrêmes, caractérisée par la nucléation et la propagation instable de multiples fissures. Elle résulte de l'interaction entre champs d'ondes mécaniques, vitesses de fissures proches des limites matérielles et compétition entre modes de rupture. L'étude expérimentale de ce processus fortement non linéaire s'appuie sur des diagnostics haute vitesse, tandis que la modélisation combine mécanique de la rupture dynamique et approches statistiques. La compréhension de ces mécanismes est cruciale pour la prédiction et la maîtrise de la tenue des structures soumises aux chocs et explosions. Pour faire le point sur les différents aspects du sujet, le [laboratoire GeM](#) organise un workshop de 2 jours qui sera consacré au cas dynamique de la fragmentation et à la propagation rapide de fissure. Cet événement fait suite à une [première édition](#) en Novembre 2022 à Marseille financée par le GDR MecaWave.

On s'intéressera en particulier : (1) aux motivations physiques et industrielles du problème, (2) à différentes modélisations possibles par la mécanique de la rupture, (3) aux approches numériques adaptées aux contextes dynamique.

Cet état de l'art sera assuré par une douzaine d'exposés de 35 min + 10 min de questions donnés par des spécialistes francophones du sujet.

- **Pour assister** : l'inscription est gratuite et **obligatoire** avant le 31/10/2025, via le lien Framaforms <https://framaforms.org/workshop-thematique-fragmentation-dynamique-des-solides-19-et-20-novembre-2025-1757941785>

Nombre de participants limité à 40 personnes

- **Pour présenter un poster** : fournir un titre et court résumé lors de votre inscription

### Organisation Scientifique

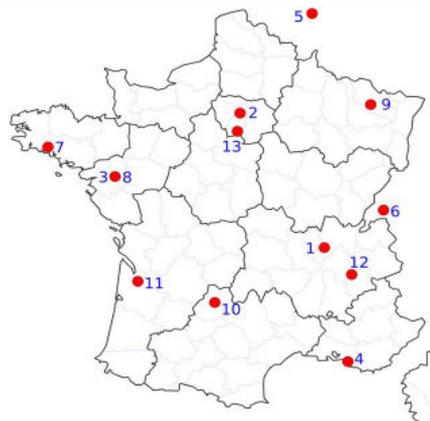
- Rian Seghir : [rian.seghir@ec-nantes.fr](mailto:rian.seghir@ec-nantes.fr)
- Nicolas Favrie : [nicolas.favrie@univ-amu.fr](mailto:nicolas.favrie@univ-amu.fr)
- Thomas Heuzé : [thomas.heuze@enib.fr](mailto:thomas.heuze@enib.fr)

### Organisation administrative

Sophie Schmid : [sophie.schmid@ec-nantes.fr](mailto:sophie.schmid@ec-nantes.fr)

## Programme Provisoire

Mercredi 19		Jeudi 20	
	Gergely Molnar (CR, LAMCOS) <sup>(1)</sup>		Christophe Czarnota (PU, LEM3) <sup>(9)</sup>
09:00 – 09:45	Avantages et difficultés de la modélisation de la fissuration dynamique par la méthode du champ de phase		Comportement dynamique des matériaux poreux sous choc (et effets d'interaction)
	Corrado Maurini (PU, Institut d'Alembert) <sup>(2)</sup>		Skander El MAI (IR, CEA-Gramat) <sup>(10)</sup>
09:45 – 10:30	A variational approach to fracture incorporating any convex strength criterion		Fragmentation d'enveloppes métalliques : du développement des instabilités à la dispersion des éclats
10:30 – 11:00	<b>CAFE &amp; Posters</b>		
	Nicolas Moes (PU, UCL) <sup>(5)</sup>		Jérémie Girardot (Cherch., I2M) <sup>(11)</sup>
11:00 – 11:45	Could an optimization of the material mesh improve fragmentation simulations ?		Modélisation par description discrète Récents développements et applications en multi-fissuration dynamique
	Guillaume Anciaux (Rsch Assoc, EPFL) <sup>(6)</sup>		Pascal Forquin (PU, 3SR) <sup>(12)</sup>
11:45 – 12:30	Non smooth time-integrators for dynamic fragmentation: a path to reliable statistics for space debris		Caractérisation des propriétés de fragmentation dynamique dans différents matériaux fragiles. Apports de la microtomographie, de l'imagerie ultra-rapide et synchrotron
12:30 – 14:00	<b>Déjeuner</b>		<b>Déjeuner &amp; Visite des installations expérimentales</b>
	Julien Réthoré (DR, GeM) <sup>(3)</sup> & Adrien Renaud (MCF, IUSTI) <sup>(4)</sup>		Gilles Besnard (IR, CEA) <sup>(13)</sup>
14:00 – 14:45	Non-elliptic damage formulation for dynamic fragmentation		Etude de la fragmentation par stéréocorrélation lors d'expériences de détonique.
14:45 – 15:00	<b>Session Posters</b>		<b>CAFE &amp; Posters</b>
15:00 – 15:15			<b>Discussions Benchmarks</b>
15:15 – 15:30			
15:30 – 16:00	<b>CAFE &amp; Posters</b>		
	Yann Even (Naval Group) <sup>(7)</sup>		
16:00 – 16:45	Détonation au contact - Ejection d'assiette et perforation		
16:45 - 17h30	à définir <sup>(8)</sup>		



## Résumés

### Gergely Molnar <sup>(1)</sup>

Gergely Molnar est chercheur CNRS à l'INSA de Lyon, au sein du laboratoire LaMCoS. Ses travaux portent principalement sur la modélisation de la ruine — incluant la fissures, la plasticité et la formation de bandes de cisaillement — à l'aide de modèles diffus. Il s'intéresse également à la compréhension ses mécanismes à l'échelle atomique dans une grande variété de matériaux, notamment les verres et les céramiques. Enfin, il contribue à la conception d'architectures de matériaux visant à améliorer leur ténacité.



#### **Avantages et difficultés de la modélisation de la fissuration dynamique par la méthode du champ de phase**

Cette présentation met en lumière les avantages intrinsèques de la méthode du champ de phase pour la modélisation de la fissuration dynamique dans les matériaux fragiles et viscoélastiques. Elle montre comment cette approche permet de reproduire des observations expérimentales sans nécessiter de calibrage, tout en soulignant les défis associés à la modélisation de la fragmentation. L'objectif est de fournir un ensemble de lignes directrices pour modéliser de manière efficace la propagation dynamique des fissures.

### Corrado Maurini <sup>(2)</sup>

I am Professor of Solid Mechanics at the d'[Alember Institute](#) at Sorbonne Université in Paris, France. I received my Ph.D. in Mechanics in 2005 through a joint program between the University of Rome La Sapienza and Paris 6 – Pierre and Marie Curie University, after earning Master's degrees at La Sapienza and Virginia Tech. My research focuses on the theoretical and computational mechanics of nonlinear solids and structures, with an emphasis on variational approaches. Applications include the foundations of fracture and damage, phase-field models of fracture, nonlinear elasticity, plates and shells, morphing structures, and active materials.

#### **A variational approach to fracture incorporating any convex strength criterion**

We recently proposed a novel variational phase-field fracture model that incorporates arbitrary strength criteria while maintaining consistency with Griffith's criterion [\[link\]](#). Unlike traditional models, in this formulation the phase-field variable doesn't affect material stiffness but modulates elastic energy with linear growth outside a strength domain that shrinks as damage progresses. This framework opens the perspective to unify, within a single consistent variational theory, key concepts developed over the centuries to predict or prevent material failure: Griffith and cohesive crack models, damage models, plasticity, strength criteria, and limit analysis.

## Nicolas Moes <sup>(5)</sup>

Nicolas MOËS, Professeur à UCLouvain Belgique. Après un post-doctorat aux Etats-Unis de 5 ans (Université du Texas à Austin et Northwestern University à Chicago), Nicolas MOËS a été ensuite professeur à l'Ecole Centrale de Nantes pendant plus de 20 ans. Ses domaines de recherche concernent principalement la mécanique de la rupture et du contact sous des angles à la fois théorique et numérique. Depuis un an, il est professeur à l'Université Catholique de Louvain en Belgique où il travaille sur une ERC Synergy en collaboration avec le Professeur Jean-François Remacle.



### Could an optimization of the material mesh improve fragmentation simulations ?

La simulation de la fragmentation nécessite des maillages fins. Malgré la finesse du maillage, les résultats de calcul peuvent être très influencés par l'orientation des éléments (surtout avec une approche cohésive). On est donc tenté de modifier le maillage pour avoir les meilleurs résultats possibles. Cependant, le changement de maillage en cours de calcul pose d'autres difficultés. Le but de l'exposé est de dresser un état des lieux et des avancées sur l'optimisation du maillage pour la mécanique de la rupture.

## Guillaume Anciaux <sup>(6)</sup>

Guillaume Anciaux got his master's from the Graduate School in Electronics, Computer Sciences, Telecommunications, Mathematics and Mechanics (ENSEIRB-MATMECA), Bordeaux, France, with a Computer Science degree in 2003. Then, he started his PhD in 2003 with Prof. Coulaud and Prof. Roman in the High Performance Computing team ScAIApplix at INRIA (Bordeaux, France). His Ph.D work focused on multiscale concurrent coupling methods to bridge molecular dynamics with finite elements. He then joined the team of J.F. Molinari at EPFL, where he explored computational solid mechanics, for various scales, models, and computing architecture. In particular, contact mechanics, tribology, and material defects were topics he contributed to during the past decade. More recently, G. Anciaux worked on promoting Open Source software and Open Research Data for solid-mechanics field. For instance he is involved in the editorial board of the Diamond Open Access journal JTCAM, with the goal to promote dataset curation. He is also active developer of several simulation software for solid-mechanics such as Akantu (HPC, Finite elements for contact and fracture), LibMultiscale (multiscale atomic-to-continuum coupling) and Tamaas (Spectral boundary element method for contact mechanics). He also lead the developments of Data management software such as BlackDynamite (parametric study management) and Solidipes (dataset curation online/offline platform).

### Non smooth time-integrators for dynamic fragmentation: a path to reliable statistics for space debris

Dynamic fragmentation simulations are essential for accurately predicting material behavior under high strain-rate conditions. However, explicit integration schemes that couple an extrinsic cohesive-zone model (CZM) with penalty-based contact frequently exhibit numerical instabilities. In fragmentation modeling, such instabilities have traditionally been controlled through ad-hoc dissipation. However, the energy increase originate from the unbounded initial cohesive stiffness, the transitions between cohesive and contact stiffness, and from the transition to softening behavior in the traction–separation law. Non-smooth transitions directly lead to a severely reduced explicit time step. After a detailed analysis of these instabilities and the introduction of smooth mitigation strategies, the contact-cohesion change of stiffness is demonstrated as the leading factor to instability. We then propose a non-smooth explicit–implicit integration scheme that maintains the total energy at consistent levels, even for large time steps determined by the bulk-CFL condition. The approach's computational efficiency, together with its stabilization of the number and size of emerging fragments, provides enhanced robustness for numerical fragmentation models.

<p>Julien Réthoré <sup>(3)</sup></p>	<p>Adrien Renaud <sup>(4)</sup></p>
<p>Julien Réthoré is a senior CNRS scientist at GeM working on experimental, modelling and numerical approaches of dynamic fracture.</p> 	<p>Currently associate professor at Aix-Marseille Université (France), my research focuses on hyperbolic problems in nonlinear dissipative solids through the development of dedicated numerical approaches and mathematical models.</p>
<p><b>Non-elliptic damage formulation for dynamic fragmentation</b></p>	
<p>Non-local damage modeling usually relies on an elliptic equation that invokes a characteristic length. In this contribution, alternative formulations relying either on parabolic or hyperbolic governing systems will be presented. The emphasis will be both on theoretical aspects and on the numerical implementation. Results on standard benchmarks will be presented to illustrate the capabilities of these formulations for the modeling of dynamic fragmentation.</p>	

<p>Yann Even <sup>(7)</sup></p>	
<p>Diplômé de l'INSA Rennes en Génie Mécanique et Automatique en 2012, j'ai d'abord rejoint Principia à Nantes où j'ai réalisé des simulations numériques pour l'industrie nucléaire et la construction navale. En 2019, j'ai rejoint Naval Group comme Equipier Vulnérabilité, en charge de l'évaluation des effets des armes sur le navire. Aujourd'hui, je suis expert en vulnérabilité aérienne et travaille en particulier à la réalisation et le pilotage des études R&amp;D du domaine.</p>	
<p><b>Détonation au contact - Ejection d'assiette et perforation</b></p>	

## Christophe Czarnota <sup>(9)</sup>

Christophe Czarnota est professeur à l'Université de Lorraine et membre du laboratoire LEM3 (Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux – UMR CNRS 7239). Ses recherches portent sur la mécanique des matériaux, avec un accent particulier sur la modélisation et la simulation numérique du comportement dynamique (impact de plaques, propagation d'ondes de choc, endommagement, fragmentation).



### **Comportement dynamique des matériaux poreux sous choc (et effets d'interaction)**

Dans cette présentation, des développements récents consacrés au comportement dynamique des matériaux métalliques poreux seront exposés. Des approches analytiques, intégrant les effets de micro-inertie, ainsi que des modélisations numériques seront abordés. L'accent sera mis sur la réponse sous choc et les grandeurs caractéristiques associées, à travers des comparaisons entre modélisation analytique, simulations numériques et résultats expérimentaux.

## Skander El Mai <sup>(9)</sup>

Après une thèse sur le développement des instabilités plastiques, soutenue en 2014 à l'université de Lorraine, site de Metz, Skander EL MAI a poursuivi plusieurs travaux au CEA-Gramat pour une meilleure compréhension du phénomène de fragmentation d'enveloppes métalliques. Depuis 3 ans, son activité s'est réorientée pour traiter notamment des charges creuses, de leur fonctionnement à leur capacité de pénétration dans une cible, en passant par la formation et la fragmentation de leur jet.

### **Fragmentation d'enveloppes métalliques : du développement des instabilités à la dispersion des éclats**

Le CEA-DAM étudie et conçoit des objets en forme d'enveloppes métalliques, soumises à des sollicitations extrêmes qui peuvent résulter, notamment, de la détonation d'un chargement explosif, et qui conduisent à leur rupture. Il convient d'évaluer les effets potentiellement destructeurs générés. La démarche mise en œuvre pour déterminer les gerbes d'éclats sera présentée. Elle s'appuie sur des modèles simplifiés, ajustés empiriquement sur des expériences plus ou moins complexes, qui fournissent des tendances pertinentes. Mais ces modèles, ne décrivant aucunement la physique en jeu, sont complétés par des modélisation plus fines dont la vocation est de reproduire les mécanismes qui gouvernent la fragmentation à partir de solutions analytiques sur des géométries simples. Les éclairages que ces derniers apportent doivent contribuer à orienter les développements physico-numériques nécessaires pour la simulation, par codes de calcul en dynamique rapide, du processus intégral de fragmentation d'objets d'intérêt.



Jérémie Girardo <sup>(11)</sup>

**Modélisation par description discrète : Récents développements et applications en multi-fissuration dynamique**

Brittle materials are studied in a wide range of applications: in civil engineering through materials used in the construction of buildings and structures; in geoscience, for the behavior of soils and rocks; in aerospace, via high-performance materials such as technical ceramics for the insulation or protection of on-board systems and combustion engines, in defense, for the protection of goods and people.

All these applications involve, the need to design structures under dynamic loadings. Knowledge of dynamic failure mechanisms must therefore be taken into account in models at different scales, from the engineering one to the much finer scale describing material heterogeneity, while covering all the intermediate scales. The modeling of dynamic damage in brittle materials is still largely an open question. The intrinsic difficulty of modeling multiple cracks calls the development of non-trivial numerical methods. Continuous approaches are widely used for these simulations, and are already producing encouraging results. However, they also present numerical instabilities, implementation difficulties and, in general, are confronted with the continuous representation of a naturally discrete problem. In this respect, discrete approaches are attractive because of their simplicity of mathematical implementation and their closeness to the discrete nature of the cracking phenomenon. They are still in the maturing phase, particularly in the dynamic field. The discrete element method was originally developed for granular media. It consists in evaluating the contact forces on a multitude of "discrete" elements, generally spherical. The position of these elements over time is then tracked by integrating accelerations, in the case of the smoothed contact dynamic.

This presentation will review current work to test the ability of this numerical method to deliver qualitative and quantitative results in fast dynamics configurations. After introducing the basic concepts of the method and the recent improvements, several examples at different modeling scales will be presented and discussed in order to highlight the perspectives of current research work involving both numerical/computational skills and theoretical mechanics via the exploration of the discrete/continuous link.

## Pascal Forquin <sup>(12)</sup>

Pascal Forquin est professeur à l'Université Grenoble Alpes depuis 2013, après un parcours marqué par une agrégation en mécanique (1998), un doctorat à l'ENS Cachan (2003) sur la fissuration des matériaux fragiles sous impact, un post-doctorat à Madrid, puis 8 années en tant que MCF puis PU à l'Université de Lorraine (2005-2013). Ses travaux portent sur le comportement dynamique des matériaux fragiles (céramiques, bétons, roches), en particulier les mécanismes d'endommagement et de fragmentation. Il dirige l'équipe Risque et Vulnérabilité du laboratoire 3SR, est responsable de la plateforme ExperDYN, et a porté deux chaires industrielles (Brittle's CODEX - Saint-Gobain) sur le comportement des matériaux sous conditions extrêmes. Il est aussi membre actif de l'association européenne DYMAT.



### **Caractérisation des propriétés de fragmentation dynamique dans différents matériaux fragiles sur une large plage de vitesses de déformation.**

#### **Apports de la microtomographie, de l'imagerie ultra-rapide et de l'imagerie synchrotron**

Les matériaux fragiles sont soumis à des chargements rapides dans de nombreuses applications conduisant à des processus de fragmentation dynamique intenses et particulièrement brefs (quelques microsecondes ou dixièmes de  $\mu\text{s}$ ). Parmi les applications étudiées au sein du Laboratoire 3SR, on peut citer la fragmentation des céramiques à blindage sous chargement d'impact balistique, la fragmentation de grêlons de glace d'eau sous impact, la génération de fragments millimétriques et submillimétriques d'hydrogène injectés au sein de réacteurs Tokamak dans le but de limiter le risque de disruption (instabilité du plasma). On peut également citer la problématique de la fragmentation du verre utilisé comme matrice pour contenir des déchets radioactifs si le conteneur est soumis à un chargement d'impact ou de blast. Dans tous ces cas d'application, il est essentiel de pouvoir prédire la distribution de fragments générée sous haute vitesse de chargement. La compréhension ainsi que la caractérisation de ces processus de fragmentation dynamique et de l'état final de fragmentation s'avèrent nécessaires.

Pour explorer ces mécanismes, de nouvelles techniques expérimentales sont développées au sein du Laboratoire 3SR. Ces techniques visent à étudier la cinétique d'endommagement en temps résolu et l'état final de fragmentation ainsi que le comportement mécanique résiduel du milieu fragmenté. Pour ce faire, ces techniques font appel à des analyses par microtomographie, à de l'imagerie ultra-rapide et de l'imagerie synchrotron. Cette présentation propose un aperçu des possibilités et des limites de ces différentes techniques.



Gilles Besnard <sup>(13)</sup>

**Etude de la fragmentation par stéréocorrélation lors d'expériences de détonique.**

Depuis quelques temps, nous observons un intérêt grandissant sur l'étude de la fragmentation appliquée à des expériences de détonique. Quelques mesures permettent d'obtenir des informations sur le temps d'apparition des fragments, mais elles se révèlent souvent ponctuelles et n'apportent pas d'informations supplémentaires. Les mesures par imagerie permettent d'observer la formation des éclats locaux sur un champ global tout en fournissant des mesures quantitatives sur les temps d'apparition de ces derniers et les champs cinématiques correspondants. Cependant, le contexte spécifique de la détonique (grand déplacement, évolution de la texture du matériau, matériel d'acquisition spécifique et éclairage inhomogène), rend complexe la mise en place des moyens de mesure par imagerie et ne permet pas, pour le moment, d'obtenir des incertitudes de mesures aussi faibles que celle acquises lors d'expérience de laboratoire. Cette présentation a pour objectif de présenter quelques résultats acquis en stéréocorrélation lors d'expériences de détonique, en mettant l'accent sur les problématiques qui leurs sont spécifiques. Elle présentera également les pistes d'améliorations pour les contourner afin d'obtenir des incertitudes toujours plus faibles d'une expérience à l'autre.

## Plan du site

L'entrée principale se trouve au 1 rue de la Noe.

Le workshop se déroulera au sein du bâtiment S, à l'autre extrémité du site.



De la gare SNCF de Nantes (sortie nord) ~ 35 minutes en transport en commun

- Prenez le tram ligne 1 direction F. Mitterrand / Jamet jusqu'à l'arrêt Commerce.
- À Commerce, changez pour le tram ligne 2, direction Orvault Grand-Val.
- Restez dans le tram ligne 2 jusqu'à l'arrêt Ecole Centrale – Audencia.
- Depuis cet arrêt, l'école est à environ 1-2 minutes de marche.