

## Proposition de sujet de thèse

### Effets de micro-inertie et interactions entre vides cylindriques dans des matériaux poreux anisotropes soumis à des chargements dynamiques

#### Mots clés

Endommagement dynamique – matériaux ductiles poreux – effets micro-inertiels – anisotropie – modélisation et simulation numérique

Etablissement : Université de Lorraine

Ecole doctorale : CM2P – Chimie, Mécanique, Matériaux, Physique

Spécialité : Mécanique des matériaux

Unité de recherche : LEM3, UMR CNRS 7239, Metz

Financement : Contrat doctoral UL – Rémunération mensuelle brute : 2300.00 €

Début de la thèse : **1<sup>er</sup> octobre 2026**

Date limite de candidature : **15 avril 2026**

#### Description de la problématique de recherche

Les matériaux métalliques poreux offrent un fort potentiel pour la conception de structures de protection et de mitigation de choc dans des secteurs variés tels que l'aéronautique, la défense, le maritime ou l'automobile. La porosité peut être intrinsèque ou résulter d'un procédé de fabrication contrôlé, tel que la fabrication additive, qui permet la réalisation de matériaux architecturés complexes à cellules ouvertes (par ex. Fleck et al., 2002) ou de métaux poreux à cellules fermées (par ex. Lovinger et al., 2021 ; Wang et al., 2023).

Sous chargement dynamique (par exemple lors d'un impact), les accélérations locales, particulièrement importantes au voisinage des parois des vides, influencent fortement la réponse du matériau à l'échelle macroscopique. Ces effets micro-inertiels (e.g. Molinari & Mercier 2001, Sartori et al., 2015, 2016) permettent d'introduire des paramètres liés à la taille et à la forme des vides, qui jouent un rôle essentiel dans la régularisation de l'endommagement (e.g. Subramani et al., 2020 ; Hosseini et al., 2025), et l'établissement des lois d'échelle impliquant un paramètre physique caractérisant la microstructure poreuse (e.g. Czarnota et al. 2020).

La plupart des approches existantes considèrent cependant des matériaux poreux composés d'une population de vides de rayon moyen, noyés dans une matrice isotrope. Or, les matériaux réels présentent fréquemment :

- une hétérogénéité en taille et en forme des vides,
- une organisation spatiale non aléatoire,
- et, dans certains cas, une anisotropie de la matrice (texture, procédés de fabrication).

La prise en compte conjointe de ces aspects met en évidence que la réponse dynamique est gouvernée non seulement par des effets de taille, mais également par des effets d'interaction entre vides (El Ansi et al. 2024), susceptibles d'induire une anisotropie effective à l'échelle macroscopique, même lorsque la matrice est initialement isotrope.

Le cœur du projet de thèse consiste à intégrer explicitement les effets d'interaction entre vides dans l'analyse du comportement dynamique des matériaux poreux. Dans ce cadre, le ou la candidat(e) sera amené(e) à développer des VER numériques destinés à confronter, par des calculs aux éléments finis, les prédictions du modèle analytique développé au cours de la thèse.

L'étude portera sur des structures soumises à des chargements dynamiques et comportant des vides cylindriques à section circulaire fortement élançés (de type aiguilles), insérés dans une matrice anisotrope. Ce travail combinera la prise en compte des effets de micro-inertie, de l'anisotropie structurelle et de l'anisotropie matérielle. Plus globalement, la démarche vise à proposer des stratégies d'optimisation de structures de protection soumises à des sollicitations dynamiques.

### Objectifs

L'objectif est de développer un modèle analytique décrivant le comportement dynamique de matériaux poreux contenant des vides cylindriques à section circulaire noyés dans une matrice anisotrope.

Des études s'appuyant sur des VER numériques sous chargement dynamique permettront la validation de l'approche analytique sur des configurations élémentaires, puis l'analyse de configurations plus complexes pour caractériser les effets d'interaction et de longueur interne associée à la micro-inertie.

Dans ce cadre, l'utilisation de l'apprentissage automatique pourra être envisagée afin d'explorer les lois d'interactions candidates et de quantifier les incertitudes associées aux prédictions. Le candidat sera conduit à aborder les étapes suivantes qui mêlent modélisation analytique et simulations numériques :

1. Il s'agira tout d'abord de mener une analyse critique des travaux de la littérature traitant des effets de micro-inertie pour des vides cylindriques, de l'effet induit par la présence d'hétérogénéités de taille et de forme des vides, des effets d'interaction entre vides sous chargement dynamique et de stratégies et outils développés pour la construction de VER numériques ;
2. Des VER numériques seront ensuite développés pour des cas de simulations en dynamique rapide sous Abaqus/Explicit. Des VER contenant des vides cylindriques dans une matrice anisotrope seront particulièrement étudiés afin de mettre en lumière les effets d'interactions entre les vides sur le comportement dynamique du matériau.
3. A partir des résultats numériques, un modèle analytique couplant effets de micro-inertie, vides cylindriques (fortement allongés) et anisotropie sera développé et enrichi, en y intégrant des lois d'interaction permettant de décrire de façon plus pertinente le comportement dynamique des matériaux poreux étudiés.

### Profil et compétences recherchées

Le (la) candidat(e) devra disposer de solides connaissances en mécanique des matériaux et en mécanique des milieux continus, ainsi que d'une bonne maîtrise de la simulation numérique sous Abaqus. Des compétences en programmation scientifique (par exemple Python ou Fortran) seront nécessaires. Une expérience ou des connaissances en apprentissage automatique (par exemple approche bayésienne) constitueront un plus.

### Candidature

Le dossier de candidature est à envoyer à Christophe Czarnota et Cédric Sartori (adresse e-mail ci-dessous) et doit comporter les éléments suivants :

- CV détaillé
- Lettre de motivation
- Relevé de notes du M1 (Semestre 7 et Semestre 8) et M2 (Semestre 9 obligatoire, Semestre 10 si possible)
- Lettre de recommandation

### Direction de la thèse

Prof. Christophe Czarnota  
Dr. Cédric Sartori

[christophe.czarnota@univ-lorraine.fr](mailto:christophe.czarnota@univ-lorraine.fr)  
[cedric.sartori@univ-lorraine.fr](mailto:cedric.sartori@univ-lorraine.fr)

Laboratoire d'Etude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux (LEM3) CNRS UMR 7239  
Université de Lorraine, Campus Technopole, Metz, France

### Références bibliographiques

- Czarnota, C., Molinari, A., Mercier, S., 2020. *Int. J. Plast.* (135), 102816.  
El Ansi, M., Sartori, C., Czarnota, C., 2024. *Mech. Mater.* (198), 105112.  
Fleck N., Deshpande V., Ashby M., 2010. *Proc. Royal Soc. London* (466), 2495-2516.  
Hosseini, N., Virazels, T., Jacques, N., Rodríguez-Martínez, J.A., 2025., *Mech. Mater.* (206), 105339;  
Loving, Z., Czarnota, C., Ravindran, S., Molinari, A., Ravichandran, G., 2021. *J. Mech. Phys. Solids* (154), 104508.  
Molinari, A., Mercier, S., 2001. *J. Mech. Phys. Solids* (49), 1497–1516.  
Sartori, C., Mercier, S., Jacques, N., Molinari, A., 2015. *Mech. Mater.* (80), 324–339.  
Sartori, C., Mercier, S., Jacques, N., Molinari, A., 2016. *Int. J. Solids Struct.* (97-98), 150 – 167.  
Subramani, M., Czarnota, C., Mercier, S., Molinari, A., 2020. *Int. J. Fract.* (222), 197–218.  
Wang, X., Li A., Liu, X., 2023. *Mater. Letters* (335), 133741.