

Titre du sujet : Projet de Thèse : Matériaux architecturés à rupture différée

- Unité de recherche : LSPM, UPR 3407, Université Sorbonne Paris Nord / CNRS
- Discipline : Mécanique des solides et science des matériaux
- Direction de thèse : Oguz Umut Salman (LSPM)
- Contact : umut.salman@lspm.cnrs.fr ; fabien.cazes@lspm.cnrs.fr
- Domaine de recherche : Matériaux architecturés, fabrication additive polymère, rupture, endommagement, instabilités mécaniques, modélisation par éléments finis, corrélation d'images numériques.
- Mots-clés : matériaux architecturés ; rupture différée ; métamatériaux ; zones sacrificielles ; pantographe ; fabrication additive ; polymères ; DIC.

1 Informations pratiques

- *Laboratoire* : Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux, LSPM, UPR 3407.
- *Financement* : École Doctorale Galilée (sous réserve de validation).
- *Audition* : 16 juin 2026.
- *Contact* :
 - Umut SALMAN : umut.salman@lspm.cnrs.fr
 - Fabien CAZES : fabien.cazes@lspm.cnrs.fr

2 Profil recherché

Le candidat ou la candidate devra disposer d'une formation solide en mécanique des solides et/ou en science des matériaux (Master 2, école d'ingénieur, ou équivalent).

Compétences attendues

- Bases en mécanique (élasticité, instabilités, rupture/endommagement).
- Bonne autonomie en calcul scientifique (Python) et traitement de données.
- Pratique ou appétence pour la modélisation par éléments finis.

Atouts (non requis)

- Expérience en fabrication additive polymère (FFF, SLA) et/ou en essais mécaniques.
- Expérience en mesure de champs par corrélation d'images (DIC).
- Intérêt pour les métamatériaux et les architectures à zones sacrificielles.

3 Candidater

Contrat doctoral sous réserve de financement (voir section *Informations pratiques*). Une pré-sélection des candidatures peut être engagée en amont.

Dossier à transmettre par email

- CV (1 à 2 pages).
- Relevés de notes M1 et M2 (ou équivalent).
- Lettre de motivation (1 page) indiquant l'intérêt pour le sujet et les compétences pertinentes (numérique et/ou expérimental).
- Si disponible : stage(s), rapport(s), préprint(s) ou code/portfolio.

Les candidatures reçues avant le 31 mai 2026 seront examinées en priorité, afin de pouvoir organiser des entretiens avant la date d'audition.

4 Introduction et Problématique

Le projet "Matériaux architecturés à rupture différée" s'attaque à un verrou technologique majeur de la mécanique des solides : la gestion de la rupture catastrophique des matériaux fragiles. Traditionnellement, l'endommagement dans ces matériaux se localise de manière extrême dans une macro-fissure unique, un phénomène lié à la perte d'élasticité et d'ellipticité des équations d'équilibre. Notre ambition est de s'affranchir de cette fatalité en concevant des métamatériaux [1] où chaque sous-élément fragile échoue de manière indépendante. Nous souhaitons relier l'architecture structurelle à une séquence d'endommagement progressive conduisant à une rupture par paliers [2], permettant ainsi d'identifier et de manipuler les paramètres qui contrôlent le retard à la rupture finale. Ces paliers émergent d'un concept de délocalisation de la déformation, défini comme effet architectural conduisant à une largeur finie de la zone de localisation de la déformation. L'originalité du sujet est que la délocalisation ne repose pas sur une régularisation numérique ni sur un paramètre matériau : elle est imposée par l'architecture et constitue une propriété émergente de la structure. Il est intéressant de remarquer que certains matériaux naturels (nacre [3], structures osseuses [4], etc.) limitent les ruptures catastrophiques du fait d'un agencement particulier de leur microstructure. Ceci illustre la faisabilité de l'objectif et pourra servir de source d'inspiration pour la conception d'architectures.

5 État de l'Art et Fondements Théoriques

La stratégie proposée repose sur le concept innovant de mitigation de la rigidité. L'idée est de coupler une sous-structure locale fragile à une sous-structure dite "floppy" (molle) de type pantographe [5], ou plus largement une architecture favorisant la délocalisation de la déformation. Contrairement aux matériaux classiques, la description continue de ces métamatériaux est dominée par l'élasticité de flexion, ou élasticité de gradient, plutôt que par l'élasticité de traction conventionnelle. Un aspect fondamental de cette approche est l'homogénéité réentrante : la capacité du système à reconstruire une déformation uniforme à de hauts niveaux d'étirement. Cette phénoménologie sera modélisée via un cadre continu de type Ginzburg-Landau où la déformation macroscopique est traitée comme un paramètre d'ordre. L'amélioration de la résistance à la rupture des matériaux architecturés est un sujet d'actualité, parfois abordé via d'autres approches, comme l'augmentation du désordre de la structure [6].

6 Plan de Travail et Méthodologie

Le projet s'articule autour de trois axes de recherche synergiques. L'axe théorique se concentrera sur l'établissement des principes de conception d'architectures à zones sacrificielles et sur l'étude des instabilités

mécaniques, telles que le snap-back et le snap-through, pour favoriser la délocalisation de la rupture.

En parallèle, l'axe numérique servira de plateforme d'intégration en s'appuyant sur des modélisations par Éléments Finis standards. Ces simulations permettront de reproduire les bifurcations caractéristiques et de faciliter la confrontation directe aux champs de mesures expérimentaux. Nous envisagerons également l'inclusion de comportements viscoélastiques pour stabiliser les fronts de micro-fissuration.

Enfin, l'axe expérimental aura pour mission de transformer ces concepts analytiques en géométries physiques grâce à la fabrication additive. La géométrie finale sera un compromis entre la propriété visée (rupture différée), l'imprimabilité et la faisabilité des essais. Nous testerons des réseaux composites à haut contraste pour caractériser la rupture différée de la structure et comparer les champs de déformation locaux aux prédictions de nos modèles. Un contraste matériau (bi-matériau) pourra être exploré en extension si nécessaire et si la faisabilité du procédé est confirmée. Le projet s'appuie sur deux procédés déjà disponibles au laboratoire : Fused Filament Fabrication (FFF) (coût réduit, mise en œuvre simple, pas de post-traitement lourd) et stéréolithographie (meilleure résolution, porosité souvent plus faible, possibilité de polymères plus souples). Les matériaux issus de ces procédés ont été caractérisés au LSPM dans une thèse récemment soutenue [7]. Le comportement des polymères étudiés pourra être dépendant du temps sous l'effet de la viscoélasticité et de la viscoplasticité, et éventuellement hyperélastique selon le matériau retenu et les conditions d'essai (température, vitesse de chargement). L'utilisation de la corrélation d'images numériques (DIC) sera ici primordiale pour identifier précisément l'initiation de l'endommagement et suivre sa propagation diffuse, comme illustré par nos designs préliminaires (voir Fig. 1). Les moyens d'essai (machines et imagerie) sont déjà disponibles au laboratoire et ont été utilisés pour des essais mécaniques avec mesure de déformation par corrélation d'images (DIC) [8]. On visera principalement des essais de traction, de compression et de cisaillement. Une analyse microscopique pourra compléter l'interprétation des mécanismes de rupture locaux (par exemple au niveau des pivots).

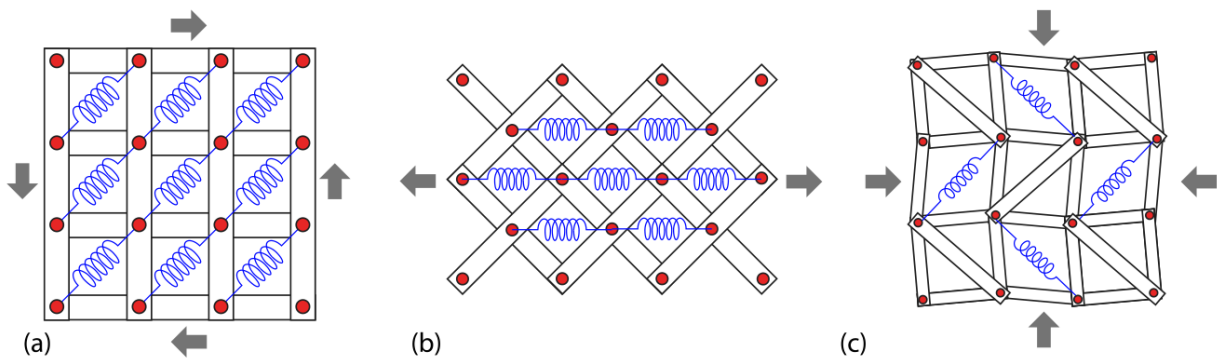


FIGURE 1 – Designs de systèmes 2D pour la délocalisation de la rupture : (a) cisaillement, (b) tension uniaxiale, (c) compression biaxiale.

7 Enjeux et Applications

En maîtrisant la connectivité structurelle, ce projet vise à transformer un matériau intrinsèquement fragile en une structure pseudo-ductile à haute ténacité. Au-delà de l'aspect fondamental, ce travail ouvre des perspectives majeures pour la conception de structures légères sécurisées, capables de produire des motifs de rupture "informatifs" ou réversibles avant d'atteindre le seuil critique de défaillance. Finalement,

on peut remarquer que le sujet s'inscrit pleinement dans les thématiques de l'équipe CMA (Conception de Matériaux Architecturés), récemment créée au LSPM : contrôle des propriétés du matériau par la conception d'architectures, avec un dialogue itératif entre modélisation et essais.

Références

- [1] Katia BERTOLDI, Vincenzo VITELLI, Johan CHRISTENSEN et Martin van HECKE. « Flexible mechanical metamaterials ». In : *Nature Reviews Materials* 2.11 (17 oct. 2017), p. 17066. ISSN : 2058-8437. DOI : [10.1038/natrevmats.2017.66](https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.66).
- [2] Gregory BOLSHAK et Michael RYVKIN. « Bio-inspired beam lattice materials with sacrificial bonds ». In : *International Journal of Engineering Science* 193 (2023), p. 103938. ISSN : 0020-7225. DOI : [10.1016/j.ijengsci.2023.103938](https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2023.103938).
- [3] Bettye L. SMITH, Tilman E. SCHÄFFER, Mario VIANI, James B. THOMPSON, Neil A. FREDERICK, Johannes KINDT, Angela BELCHER, Galen D. STUCKY, Daniel E. MORSE et Paul K. HANSMA. « Molecular mechanistic origin of the toughness of natural adhesives, fibres and composites ». In : *Nature* 399.6738 (juin 1999), p. 761-763. ISSN : 1476-4687. DOI : [10.1038/21607](https://doi.org/10.1038/21607).
- [4] Georg E. FANTNER, Tue HASSENKAM, Johannes H. KINDT, James C. WEAVER, Henrik BIRKEDAL, Leonid PECHENIK, Jacqueline A. CUTRONI, Geraldo A. G. CIDADE, Galen D. STUCKY, Daniel E. MORSE et Paul K. HANSMA. « Sacrificial bonds and hidden length dissipate energy as mineralized fibrils separate during bone fracture ». In : *Nature Materials* 4.8 (2005), p. 612-616. ISSN : 1476-4660. DOI : [10.1038/nmat1428](https://doi.org/10.1038/nmat1428).
- [5] O.U. SALMAN et L. TRUSKINOVSKY. « De-localizing brittle fracture ». In : *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 154 (2021), p. 104517. ISSN : 0022-5096. DOI : [10.1016/j.jmps.2021.104517](https://doi.org/10.1016/j.jmps.2021.104517).
- [6] Konstantinos KARAPIPERIS et Dennis M. KOCHMANN. « Prediction and control of fracture paths in disordered architected materials using graph neural networks ». In : *communications engineering* 2.1 (2023), p. 32. ISSN : 2731-3395. DOI : [10.1038/s44172-023-00085-0](https://doi.org/10.1038/s44172-023-00085-0).
- [7] Massinissa HIDER. « Caractérisation et modélisation mécanique des matériaux polymères obtenus par impression 3D ». *Encadrement* : Ioan IONESCU ; Fabien CAZES. Thèse de doctorat. 15 déc. 2025.
- [8] Sochita DY, Vannei SRY, Yann CHARLES et Fabien CAZES. « Determination of Mechanical Properties of Cambodian Sandstone under Brazilian Test and Semi Circular Bending Test ». English. Manuscript code : Techno-SRJ-0307. Submitted to Techno-Science Research Journal (Techno-SRJ), Institute of Technology of Cambodia (ITC). 2026.