

## Approche holiste de la chiralité dans les métamatériaux architecturés

**Nicolas Auffray**, Laboratoire MSME (Université Paris-Est/CNRS UMR 8208)

**Justin Dirrenberger**, Laboratoire PIMM (Arts et Métiers-ParisTech/CNAM/CNRS UMR 8006)

**Martin Poncelet**, LMT-Cachan (ENS-Cachan/CNRS UMR 8535)

### Contexte et enjeux

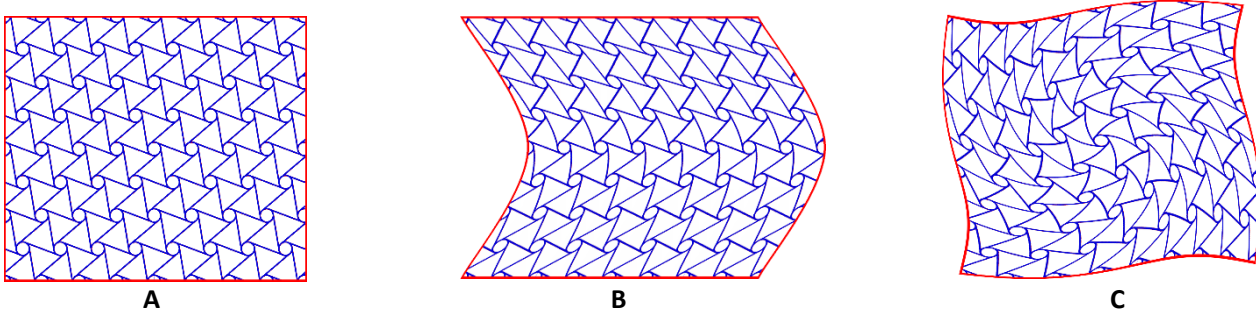
La **chiralité** est une propriété d'asymétrie géométrique aux conséquences multiples en sciences physiques ; du spin de l'électron aux galaxies spirales en passant par l'organisation du vivant et la chimie moléculaire. En mécanique aussi la chiralité n'est pas sans conséquences, notamment lorsqu'il s'agit de décrire le **comportement mécanique** de certains matériaux à coefficient de Poisson négatif [1] ; on parlera de **métamatériaux auxétiques architecturés** (MAA). Les matériaux architecturés sont des matériaux hétérogènes présentant des propriétés spécifiques améliorées du fait d'une conception morphologique et topologique intelligemment prédéfinie [2]. Cela implique généralement des longueurs caractéristiques comparables aux dimensions de la pièce produite, mettant en défaut l'hypothèse de séparabilité des échelles en mécanique des milieux continus. Les métamatériaux peuvent être considérés comme une sous-classe de matériaux architecturés aux propriétés physiques paradoxales (masse effective négative, invisibilité, coefficient de Poisson ou module de compressibilité négatif, etc.).

Les approches classiques d'homogénéisation en mécanique reposent sur l'utilisation de milieux de substitution de type Cauchy, or ceux-ci ne sont pas assez riches pour rendre compte de effets de **chiralité** et se révèlent insuffisantes pour décrire le comportement des MAA. Des modèles de milieux continus généralisés ont été proposés par le passé [3], mais ni la puissance de calcul, ni les moyens expérimentaux appropriés n'étaient disponibles pour conclure quant au rôle réel joué par la chiralité en mécanique. Les conditions humaines et technologiques existent aujourd'hui au sein de la Fédération Francilienne de Mécanique, et notre projet vise justement à les réunir via une approche trilatérale (expérimentale, théorique et numérique) avec l'objectif de **répondre à la question de la pertinence des modèles de milieux généralisés**.

### Description du projet

Pour répondre à cette question, on s'intéressera à un MAA modèle basé sur une cellule périodique *hexachirale* (HC, cf. **Fig.1-A**) choisie dans le but de **maximiser les effets non-standard** de différents modèles généralisés, i.e. anisotropie d'un milieu à symétrie hexagonale, sensibilité à la chiralité, propriétés auxétiques. Les éprouvettes de métamatériau seront obtenues par **fabrication additive** au laboratoire PIMM, et seront constituées de polyamide 11 en raison de ses faibles modules d'élasticité, son allongement à rupture élevé, son prix et sa disponibilité.

Les résultats actuellement disponibles dans la littérature concernant l'homogénéisation numérique des milieux généralisés [4] permet de définir des types de chargements et de conditions aux limites particuliers pour la sollicitation du MAA, par exemple des conditions aux limites polynomiales (cf. **Fig.1-B**). Un dispositif expérimental basé sur des éléments souples sera développé spécifiquement (cf. **Fig.2**) et adapté aux moyens expérimentaux du LMT-Cachan (machine triaxiale Astrée), le but étant de définir un essai mécanique mettant au mieux en évidence les aspects cinématiques non-standard des milieux généralisés, liés à l'apparition de **degrés de liberté microstructuraux** potentiellement couplés à la chiralité.



**FIG. 1 :** A) CELLULE HC INITIALE ;  
 B) DEFORMEE D'UNE CELLULE HC SOUMISE A DES CL PARABOLIQUES DE TYPE DIRICHLET ;  
 C) DEFORMEE D'UNE CELLULE HC SOUMISE A UNE ROTATION RELATIVE.

Les **mesures de champs de déplacements** obtenus par corrélation d'images serviront de base de comparaison pour le développement de simulations à champs complets, notamment au laboratoire PIMM, ainsi qu'aux approches d'**homogénéisation**, basées sur les différents modèles de **milieux continus généralisés** étudiés au laboratoire MSME.

Ce projet vise donc à fédérer les 3 laboratoires autour d'un projet commun mobilisant des compétences propres à chaque partenaire : fabrication additive et calcul de microstructure (PIMM), caractérisation mécanique expérimentale et mesures de champs (LMT-Cachan, Astrée ayant bénéficiée du SESAME 2006), modélisation et milieux continus généralisés (MSME). Le « coup de pouce » F2M nous permettra de financer un chercheur post-doctorant (12 mois) dont la mission sera double : dans un premier temps, assembler et exploiter les outils, d'ores et déjà disponibles de par les activités des 3 maîtres de conférences impliqués dans le projet, afin de concevoir des conditions expérimentales spécifiques pour la mise en évidence du rôle de la chiralité ; dans un second temps, le post-doctorant mènera une étude synthétique mêlant mesures de champs expérimentales, **simulations à champs complets** [5] et modélisation à l'aide de l'homogénéisation de milieux continus généralisés. Cette approche trilatérale nous semble à propos pour répondre à la problématique du projet.

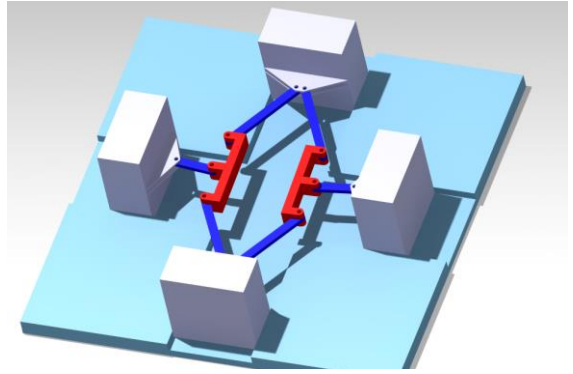


FIG. 2 : EXEMPLE DE DISPOSITIF EXPERIMENTAL POSSIBLE POUR SOLLICITER DES MODES DE DEFORMATION LIES A LA CHIRALITE.

## Retombées et perspectives

Les premières retombées seront d'ordre scientifique : déterminer la pertinence de milieux continus généralisés nécessite des travaux théoriques poussés, de la simulation numérique comme moyen d'expression de ces modèles, mais surtout des **validations expérimentales**, trop peu nombreuses, et c'est justement là l'originalité de notre projet. En perspective, des comportements anisotropes pourront être considérés pour les matériaux constitutifs. L'application de **conditions aux limites riches** (ici non-uniformes) est un axe fort de développement du LMT-Cachan. L'étude des matériaux métalliques dans le cadre de ce projet débouchera potentiellement sur des avancées dans le domaine de la plasticité à gradient et de la formulation de critères d'écoulement généralisés. Enfin, la prise en compte de **matériaux récursifs architecturés** à de multiples échelles ouvrira la voie à la conception de matériaux aux propriétés spécifiques optimisées ; le projet *DEMOCRITE* (2014-2016) porté par le PIMM vise notamment à développer la fabrication additive à grande échelle pour la fabrication de tels matériaux.

Cette **étude préliminaire** s'inscrit dans le contexte unique de la F2M, permettant de réunir théoriciens, numériciens et expérimentateurs, mais aussi dans un contexte plus large comme celui du LIA *Coss&Vita*. Nous souhaitons par ce projet amorcer une activité concertée sur les matériaux architecturés au sein de la F2M, en lien avec les thèmes scientifiques existants. L'étude exploratoire réalisée nous permettra de cerner plus précisément les débouchés technologiques envisageables dans le but de répondre à des appels à projets à l'échelle nationale et européenne, et ce dès fin 2015.

## Compétences

- **Nicolas Auffray** (MCF, MSME) travaille sur les symétries tensorielles et la chiralité en mécanique des milieux continus. Son apport sera principalement lié à la modélisation de milieux homogènes équivalents généralisés.
- **Justin Dirrenberger** (MCF, PIMM) travaille sur la mécanique des matériaux architecturés, la fabrication additive et la simulation par méthodes à champs complets. Sa contribution sera liée à ces trois thématiques.
- **Martin Poncelet** (MCF, LMT-Cachan) travaille sur les méthodes expérimentales de caractérisation, notamment les chargements multiaxiaux et les mesures de champs. Il sera en charge de la phase de caractérisation.
- Le **post-doctorant** recruté travaillera en étroite collaboration avec les 3 partenaires, à la fois sur les aspects de théorie, de modélisation et d'expérimentation mécanique.

## Budget (50k€ sur 12 mois)

- Salaire post-doctorant : **41k€**
- Coût du montage expérimental : **6k€**
- Coût des échantillons : **3k€**

## Références

- [1] R. Lakes, J. Mat. Sci., 25(9) :2287-2292, 1991
- [2] O. Bouaziz, Y. Bréchet and J.D. Embury, Adv. Eng. Mat., 10(1-2) :24-36, 2008
- [3] R.D. Mindlin, Arch. Rat. Mech. Anal., 16 :51-78, 1964
- [4] D.K. Trinh, R. Janicke, N. Auffray, S. Diebels and S. Forest, Int. J. Mult. Comp. Eng., 10(6) :527-549, 2012
- [5] J. Dirrenberger, S. Forest and D. Jeulin, Comp. Mat. Sci., 64 :57-61, 2012