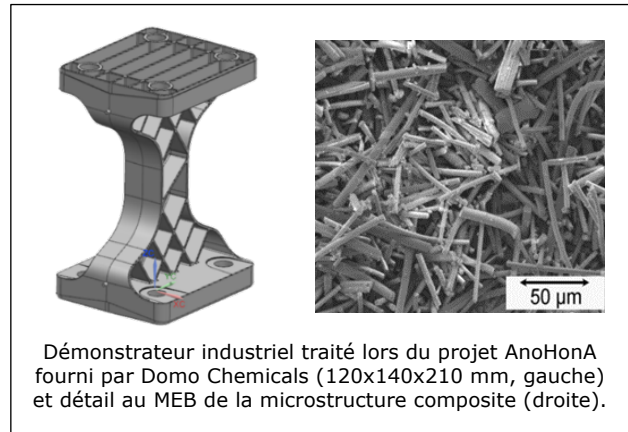


**PROPOSITION DE STAGE M2/PFE 2025**  
**Modèles numériques efficaces pour**  
**la simulation du comportement mécanique**  
**de matériaux composites**

**Contexte :**

Les propriétés mécaniques des matériaux hétérogènes dépendent fortement de leur microstructure, qui peut être localement très contrastée et anisotrope. Un exemple typique est celui des pièces injectées en polymère thermoplastique renforcé par des fibres courtes (SFRP), de plus en plus utilisées dans l'industrie automobile, ferroviaire ou aéronautique (illustration ci-contre). Les pièces obtenues par ce procédé ont une masse réduite et une recyclabilité améliorée par rapport à des solutions métalliques. Afin de permettre un dimensionnement optimal d'une structure constituée de tels matériaux, il est essentiel de disposer de modèles fiables de leur comportement. Ces modèles doivent prendre en compte cette microstructure complexe. Ceci est d'autant plus vrai lorsque les propriétés microstructurales varient dans la pièce à dimensionner, comme cela est le cas pour de telles pièces injectées.



Démonstrateur industriel traité lors du projet AnoHonA fourni par Domo Chemicals (120x140x210 mm, gauche) et détail au MEB de la microstructure composite (droite).

La construction des lois de comportement prenant en compte ces informations microstructurales (propriétés mécaniques locales et distribution spatiale des phases constitutives) repose sur des principes dit d'« homogénéisation », abordés dans divers enseignements de master. En les associant à des descriptions simplifiées des états mécaniques locaux au sein des constituants, on construit des méthodes d'homogénéisation dites en « champs moyens ». Lorsqu'on adopte de plus des hypothèses simplificatrices sur la microstructure, on aboutit à des expressions analytiques des propriétés effectives des matériaux considérés, faciles à intégrer dans des codes de calcul de structures.

Ces modèles prennent en compte les traits dominants des microstructures (fractions volumiques, rapport d'aspect et statistiques d'orientation des fibres...), mais pas leurs détails les plus fins ; ils sont ainsi souvent incapables de décrire la diversité des matériaux complexes de l'industrie.

À l'inverse, les calculs de microstructures dits en « champs complets » sont en principe capables de prendre en compte n'importe quelle micro-géométrie, mais au prix d'une complexité numérique en général trop grande pour permettre leur intégration par l'industrie dans un calcul de structure.

**Objectif :**

Le projet proposé vise à explorer une voie intermédiaire, applicable à toute géométrie microstructurale, et fournissant une estimation des propriétés effectives, certes moins performante que celles fournies par les méthodes en champs complets, mais dont le coût numérique sera notablement inférieur. Cette démarche intermédiaire est obtenue en relaxant certaines hypothèses restrictives des modèles en champs moyens classiques. Dans le cadre du stage, on mettra cette démarche en œuvre dans un cas géométriquement simple mais réaliste, permettant d'établir la faisabilité et la généralité de la démarche.

### Plan de travail indicatif :

- Bibliographie sur les méthodes d'homogénéisation en champs moyens, en particulier la formulation variationnelle de Hashin et Shtrikman et les tenseurs d'interaction associés.
- Formulation des problèmes de calcul de structures de type thermo-élastique permettant d'identifier numériquement ces tenseurs.
- Résolutions de ces problèmes dans un cas particulier de microstructure simple, au moyen d'un calcul aux éléments finis (maillage par exemple par le logiciel gmsh, résolution avec FreeFem ou FEniCS).
- Validation de l'outil créé par confrontation avec des solutions analytiques classiques.
- Exploration de cas plus généraux avec l'outil créé.

### Perspectives de poursuite en thèse :

Le stage pourra déboucher sur un projet de thèse à l'École Nationale des Ponts et Chaussées/Institut Polytechnique de Paris dans le cadre du projet de recherche AnoHonA<sup>1</sup> financé par l'Agence Nationale de la Recherche, qui visera à systématiser la démarche et à l'intégrer dans un calcul de structure multi-échelle. La démarche sera également étendue aux comportements non-linéaires dissipatifs décrits par le formalisme des milieux standard généralisés, en liaison avec un autre projet de thèse au LMA de Marseille. Les outils d'homogénéisation ainsi définis seront intégrés dans une bibliothèque logicielle ouverte (MFRONT) permettant de les intégrer facilement dans des logiciels de calcul de structures.

**Profil :**

- Niveau Master 2 ou dernière année d'école d'ingénieur, mécanique et/ou mathématiques appliquées.
- Intérêt prononcé pour la modélisation théorique et sa mise en œuvre numérique.
- Connaissances appréciées : langage de programmation (par ex Python), calcul par éléments finis.

**Durée :** 5 à 6 mois, à partir du printemps 2025

**Lieu :** Laboratoire Navier, École Nationale des Ponts et Chaussées, 77420 Champs-sur-Marne

**Encadrement :** Jérémy Bleyer, Michel Bornert, Frédéric Legoll, Sébastien Brisard (LMA Marseille)

### Candidature et informations :

Envoyer CV et lettre de motivation à :

jeremy.bleyer@enpc.fr, michel.bornert@enpc.fr, frederic.legoll@enpc.fr, sebastien.brisard@univ-amu.fr

---

<sup>1</sup> AnoHonA : Advanced Nonlinear Homogenization for structural analysis. Projet de Recherche Collaborative financé par l'Agence Nationale de la Recherche pour 48 mois, impliquant 6 laboratoires français, LMA (UMR CNRS 7031, Marseille), Navier (UME CNRS 8250, Ecole des ponts), LEM3 (UMR CNRS 7239, Univ. Metz), PPrime (UPR CNRS 3346, ISAE-ENSMA Poitiers), JLRA (UMR CNRS 7190, Sorbonne Université) et le CEA (Institut IRESNES, Centre de Cadarache) et un partenaire international (Univ. La Plata, Argentine).