

# Étude mécanique jusqu'à la rupture des matériaux architecturés obtenus par impression 3D

**Encadrement** Fabien Cazes (LSMP), Jia Li (LSPM), David Haboussa (EDF-IMSIA), Salma Barboura (LSPM).

**Contexte scientifique** Autrefois limitée à la réalisation de prototypes industriels, l'impression 3D (ou fabrication additive) est en plein développement pour la réalisation de pièces mécaniques en petite ou moyenne série. Pour gagner en coût, en masse et en temps de fabrication, les géométries imprimées en 3D sont souvent architecturées, c'est-à-dire qu'elles comportent des zones creuses disposées de façon périodique. Ces matériaux architecturés constituent une famille de matériaux de plus en plus rencontrée et devant être caractérisée sur la base d'études expérimentales, théoriques, et numériques. En plus des aspects géométriques liés à la géométrie des motifs, le procédé de fabrication additive a une incidence sur les propriétés mécaniques des matériaux obtenus. On peut noter en particulier une anisotropie importante dépendant de l'orientation des couches lors du dépôt, l'introduction d'une porosité additionnelle dans le matériau et la présence de contraintes résiduelles dans les pièces obtenues. Le comportement à la rupture est également influencé par le procédé d'impression 3D, la rupture ayant lieu plus facilement lorsque la pièce est sollicitée perpendiculairement à l'orientation des couches lors de l'impression.

**Objectifs** L'objectif de ce projet de thèse est de caractériser par des moyens expérimentaux et numériques les matériaux architecturés issus d'impressions 3D, dans le but d'optimiser leur comportement mécanique jusqu'à la rupture. Les matériaux concernés pourront soit être réalisés au LSPM par impression 3D polymère, soit être fabriqués à l'extérieur du LSPM par fabrication additive métallique. Les travaux de recherche suivants seront menés pendant la thèse :

1. Des essais expérimentaux seront réalisés afin de caractériser le comportement des matériaux issus d'impression 3D. On cherchera à identifier l'influence des phénomènes devant être pris en compte comme la viscosité, l'anisotropie, la porosité, la plasticité et l'endommagement. Les essais seront réalisés dans l'atelier de mécanique du LSPM. On utilisera dans un premier temps des éprouvettes standards avec corrélation d'images pour étudier l'influence du procédé sur le comportement du matériau. Par la suite, on développera des essais à partir d'éprouvettes composées de matériaux architecturés en utilisant des motifs classiques comme les pantographes et les nids d'abeilles.
2. Le comportement des matériaux d'impression 3D étudiés sera modélisé et implémenté numériquement. On s'attachera particulièrement à prendre en compte l'anisotropie du matériau due à son dépôt par couches successives lors de l'impression de la pièce. Cette anisotropie pourra être quantifiée par homogénéisation d'un volume élémentaire représentatif défini à l'échelle des couches composant le matériau. Le modèle obtenu sera implémenté dans un code éléments-finis performant afin de simuler le comportement macroscopique des matériaux architecturés. On s'attachera à simuler l'entièreté du processus de déformation mécanique du matériau étudié depuis sa partie élastique jusqu'à sa rupture en prenant également en compte le phénomène de plastification.
3. À une échelle plus macroscopique, un deuxième niveau d'homogénéisation sera introduit pour englober la géométrie architecturée du matériau dans la définition d'un milieu continu équivalent. La méthode d'homogénéisation développée devra prendre en compte la plastification et l'endommagement du matériau dépendant d'un critère anisotrope de calcul de la contrainte équivalente. Le modèle homogénéisé obtenu pourra être de type second-gradient dans le cadre de la théorie des milieux continus

généralisés. Ceci permettra de prendre en compte la taille importante des motifs composant le matériau remettant en cause l'hypothèse de séparation des échelles utilisée en théorie de l'homogénéisation classique.

**Calendrier** On adoptera le calendrier suivant pour la thèse, correspondant également au diagramme de Gantt représenté sur la Fig. 1 :

**Année 1** En début de thèse on commencera à réaliser des expérimentations sur des éprouvettes de géométries classiques (éventuellement des éprouvettes pour micro-machine) en étudiant notamment l'influence des paramètres d'impression 3D. À une échelle microscopique, on développera un modèle numérique simulant le comportement et la décohésion des couches composant le matériau dans le logiciel Code-Aster. Des calculs d'homogénéisation numérique seront réalisés afin d'obtenir un modèle élasto-plastique endommageable anisotrope caractérisant le comportement du matériau imprimé en 3D.

**Année 2** En deuxième année de thèse, on commencera à réaliser des essais mécaniques sur éprouvette architecturée en allant jusqu'à la rupture. Des calculs numériques seront réalisés à l'échelle des motifs d'architecture du matériau. Des méthodes d'homogénéisation numérique seront utilisées afin d'obtenir un modèle homogène équivalent du matériau architecturé. Le modèle obtenu sera anisotrope et permettra de simuler l'ensemble de la dégradation du matériau, comprenant sa plastification, son endommagement et sa rupture. Le modèle obtenu pourra être de type milieux continus généralisés (second-gradient) afin d'être moins dépendant de l'hypothèse de séparation des échelles sous-jacente à la théorie classique de l'homogénéisation.

**Année 3** En troisième année de thèse les travaux expérimentaux et numériques initiés pendant les 2 premières années de thèse seront finalisés et le rapport de thèse sera rédigé.

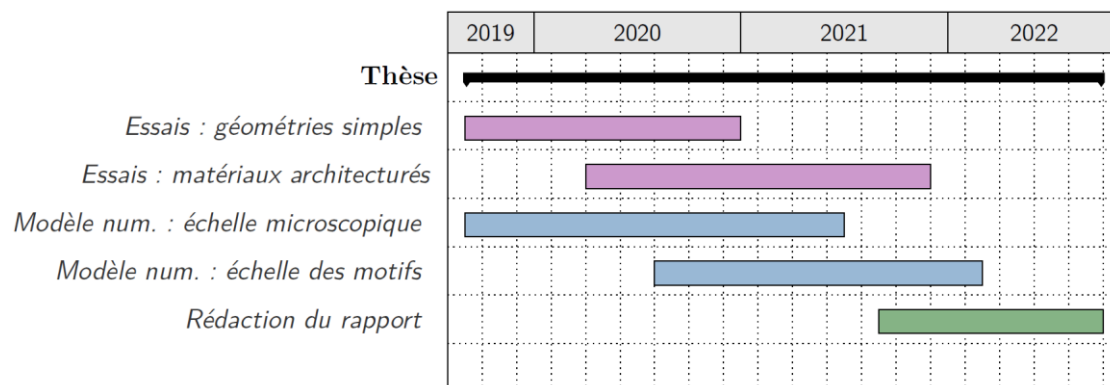


Fig. 1 - Diagramme de Gantt du projet

## Bibliographie

- [1] J. Li. Int. J. Struct. Sol., 48, 3336-3345 (2011)
- [2] J. Li et al, Int. J. Struct. Sol., 48, 3346-3358 (2011)
- [3] S. Barboura, J. Li. Int. J. Struct. Sol., 136, 60-76 (2018)
- [4] J. Li, X.-B. Zhang. Europ. J. Mech. A/Solids, 41, 70-85 (2013)
- [5] F. Cazes, M. Coret, A. Combescure. Comput. Mech. 51, 865-884 (2013)
- [6] F. Cazes, N. Moës. Int. J. Numer. Meth. Eng. 103, 114-143 (2015)
- [7] J. Li, X.-B. Zhang. Eng. Fract. Mech. 73, 505-523 (2006)
- [8] J. Liu, J. Li, G. Dirras, K. Ameyama, F. Cazes, M. Ota, Int. J. Plasticity, 100, 192-207 (2018)
- [9] X. Wang, F. Cazes, J. Li, A. Hocini, K. Ameyama, G. Dirras, Int. J. Plasticity, 128, 117-128 (2019)