



INSTITUT CLÉMENT ADER

<b>Titre du sujet</b>	Approche multi-échelles basée sur les données pour les matériaux cellulaires architecturés / Data-driven multiscale framework for architected cellular materials
<b>Directeur de thèse</b>	MARENIC Eduard, INSA Toulouse, <a href="mailto:marenic@insa-toulouse.fr">marenic@insa-toulouse.fr</a> PASSIEUX Jean-Charles, INSA Toulouse, <a href="mailto:passieux@insa-toulouse.fr">passieux@insa-toulouse.fr</a>

### Description du sujet

Enjeu sociétal et contexte. La tendance à s'orienter vers des matériaux cellulaires en application légère s'inspire principalement du bio-mimétisme. La nature a déjà développé des matériaux cellulaires comme des becs et des os d'oiseaux qui consistent en de fines peaux solides qui enveloppent une structure très poreuse. Le développement rapide de la fabrication additive (ex. *Selective Laser Melting* (SLM)), a ouvert la porte à l'optimisation topologique et en particulier à la création de matériaux de type treillis. La capacité à « imprimer » un matériau avec l'architecture en treillis choisie conduit à une efficacité structurelle élevée où la résistance et la rigidité évoluent proportionnellement à la fraction volumique. Ainsi, l'application principale des matériaux en treillis est dans les transports (aérospatiale, par exemple Fig. 1) et l'industrie avec les critères les plus stricts liés à la réduction de masse, à l'absorption d'énergie (crash) et à la gestion thermique. La tendance à s'orienter vers des matériaux alvéolaires en application légère nécessite cependant un outil dédié à leur conception et à la prédiction de leur comportement spécifique. Les outils de calcul classiques basés sur des éléments finis (EF) associés à des modèles haute fidélité conduisent à une simulation chronophage pour les matériaux de type treillis à l'échelle structurelle.

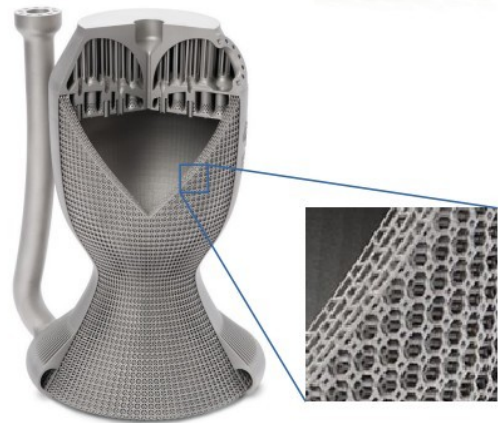


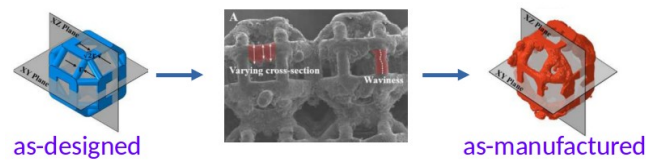
Fig 1: Moteur de fusée imprimé, cellcore.com

**Méthodes.** Une alternative est la modélisation multi-échelles (MS) [1] permettant d'obtenir le comportement du matériau à l'échelle macro à partir de la simulation de la partie représentative de la micro-échelle (haute-fidélité) avec un maillage fin tout en prenant en compte les détails géométriques/matériels. Le principal inconvénient de la modélisation MS basée sur l'homogénéisation numérique [2] est que la micro-simulation coûteuse doit être exécutée pour chaque incrément de charge et point d'intégration, ce qui entraîne d'énormes calculs répétitifs. Une solution au problème des calculs répétitifs et jamais réutilisés est proposée récemment [3, 4] et réside sur la combinaison de l'approche pilotée par les données [5, 6] et de l'homogénéisation computationnelle afin de : 1. Favoriser le couplage entre différentes échelles en espérant augmenter prédictivité des modèles à plus grande échelle, 2. Faciliter le couplage entre les données expérimentales et la simulation puisqu'elles sont du point de vue de l'approche axée sur les données des points indiscernables dans l'ensemble de données, 3. Accroître la structuration et la réutilisation



## INSTITUT CLÉMENT ADER

de la simulation haute fidélité résultats à différentes échelles pour augmenter l'efficacité du calcul. Dans le cadre multi-échelles piloté par les données (DD-MS), nous devons disposer d'une bonne base de données de matériau dont la création basée sur de nombreuses micro-simulations représente encore un coût de calcul très élevé. A ce coût non négligeable s'ajoute le défi clé qui est d'échantillonner efficacement la base de données dans le cas d'une géométrie variable à l'échelle microscopique. Ces variations se produisent soit intentionnellement, pour obtenir une structure cellulaire spécifique à un emplacement, soit accidentellement en raison de défauts liés aux limitations du processus de fabrication. Dans le projet proposé, nous traiterons des défauts qui se forment inévitablement lors du dépôt de la couche de matériau et modifient l'architecture de treillis idéale (CAO, telle-que-conçue) en architecture réelle (telle-que-fabriquée) (Fig. 2) et régissent finalement le comportement global.



**Fig. 2.** Les défauts qui se forment inévitablement lors du dépôt de la couche de matériau avec SLM modifient l'architecture telle-que-conçue en telle-que-fabriquée [7]

**Objectifs.** L'objectif principal de la thèse est le développement de l'approche DD-MS efficace basée sur les données pour la prédiction du comportement non linéaire des structures en treillis métalliques telles que fabriquées. À cette fin, le développement d'outil pour le calcul parallèle et l'homogénéisation numérique du grand nombre de simulations de treillis haute fidélité est envisagé (code python en combinaison avec l'utilisation non invasive du code EF commercial Abaqus et de la plate-forme HPC (CALMIP)). Pour rendre l'approche DD-MS efficace, le développement de l'algorithme capable d'apprendre les variations de la base de données matériaux en fonction des variations de géométrie est nécessaire. À cette fin, le travail envisagé dans la thèse est lié à l'analyse et à la classification de la morphologie du défaut, au développement de la paramétrisation compacte des variations de géométrie ainsi qu'au schéma d'incorporation des imperfections géométriques dans les modèles numériques. Les principales questions ouvertes sont liées à l'efficacité de l'échantillonnage de la base de données, à l'accélération du solveur DD et au comportement dépendant de l'histoire de chargement.

**Profil recherché.** Master recherche et/ou école ingénieur avec expérience significative recherche. Spécialité, mécanique des matériaux et des structures, mécanique numérique ou mathématiques appliquées. Compétences en éléments finis, analyse numérique, optimisation, langages de programmation (Python).

Les candidats doivent envoyer leur CV et lettre de motivation aux directeurs de thèse Jean-Charles PASSIEUX (ICA, [passieux@insa-toulouse.fr](mailto:passieux@insa-toulouse.fr)) et Eduard MARENIC (ICA, [marenic@insa-toulouse.fr](mailto:marenic@insa-toulouse.fr)).

**Période :** 2022-2025 ;

**Rattachement :** ICA UMR CNRS 5312



INSTITUT CLÉMENT ADER

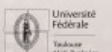
## Références

- [1] M.G.D. Geers, V.G. Kouznetsova, and W.A.M. Brekelmans. Multi-scale computational homogenization: Trends and challenges. *J. Comput. Appl. Math.*, 234(7):2175–2182, August 2010.
- [2] V.G. Kouznetsova, M.G.D. Geers, and W.A.M. Brekelmans. Multi-scale second-order computational homogenization of multi-phase materials: A nested finite element solution strategy. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 193(48-51):5525–5550, December 2004.
- [3] R. Xu, J. Yang, W. Yan, Q. Huang, G. Giunta, S. Belouettar, H. Zahrouni, TB. Zineb, H. Hu. Data-driven multiscale finite element method: From concurrence to separation. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 363:112893, May 2020.
- [4] K. Karapiperis, L. Stainier, M. Ortiz, and J.E. Andrade. Data-Driven multiscale modeling in mechanics. *J Mech Phys*, 147:104239, February 2021.
- [5] T. Kirchdoerfer and M. Ortiz. Data-driven computational mechanics. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 304:81–101, 2016.
- [6] E. Marenic, G. Seychal, JC. Passieux, Data driven approach in multiphysics framework: application to coupled electro-mechanical problems, Accepted for publication in *Comput Methods Appl Mech Eng*, December 2021.
- [7] Liu, Kamm, García-Moreno, Banhart, Pasini, Elastic and failure response of imperfect three-dimensional metallic lattices: the role of geom defects induced by SLM, *J Mech Phys Solids* 107 (2017) 160–184.

ESPACE CLÉMENT ADER  
3 rue Caroline Aigle  
31400 Toulouse Cedex 04

ÉCOLE DES MINES D'ALBI  
Campus Jarlard  
81013 Albi Cedex 09

IUT DE TARBES  
1 rue Lautréamont  
65016 Tarbes



[www.institut-clement-ader.org](http://www.institut-clement-ader.org)