

**Titre:** Comportement mécanique d'un métamatériau désordonné à base de poutres: vers un microréseau isotrope, rigide, tenace et léger, inspiré de la structure des os.

**Mots clés:** microtreillis, désordre, métamatériau, fabrication additive, élasticité, fracture

**Résumé:** La recherche de nouveaux matériaux à la fois légers et résistants mécaniquement est un enjeu majeur dans le contexte de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, en particulier dans le domaine du transport. L'émergence récente de la fabrication additive a ouvert une nouvelle voie pour le design et la fabrication de nouveaux matériaux. En autorisant une plus grande liberté sur l'arrangement de la matière, cette technologie a notamment donné naissance aux microlattices (2011), soit un arrangement judicieusement choisi de micropoutres creuses encastées. En allégeant ainsi l'ensemble de la structure grâce à une très grande porosité structurale il est possible d'atteindre des densités relatives de l'ordre de 0.1% (proches de celles des aérogels) tout en offrant une rigidité de plusieurs ordres de grandeur supérieure aux matériaux de densité équivalentes.

Cette thèse s'inscrit dans ce sillage en se proposant d'étudier l'effet du désordre architectural sur les propriétés mécaniques de réseaux de poutres. Elle est divisée en deux parties reposant sur une approche par modélisation numérique complétée par des expériences sur échantillons 3D-imprimés. Dans la première partie, nous présentons l'effet du désordre sur l'élasticité des microtreillis. En particulier nous mettons en évidence dans un modèle simple de réseaux de poutres 2D que le désordre introduit graduellement dégrade à la marge les propriétés élastiques des réseaux rigides (dominés par une réponse en traction/-

compression). Tirant parti de ces premiers résultats, nous proposons une autre voie pour créer des microtreillis 3D désordonnés, rigides et isotropes et montrons que notre architecture atteint un optimum en terme de ratio rigidité sur densité. Enfin le modèle numérique développé nous permet d'explorer des architectures plus exotiques : métanacres (composites à base de microtreillis dont la microstructure imite celle des nacres) et prédiction/optimisation de treillis 2D via des algorithmes de machine learning.

La seconde partie s'intéresse aux propriétés de fracture en tension et en compression. En premier lieu, l'effet du désordre dans des réseaux 2D est de produire une grande variabilité statistique intra-échantillon sur la ténacité calculée en utilisant le cadre de la mécanique linéaire élastique de la rupture. Les simulations numériques permettent de caractériser que le microtreillis 3D amorphe et optimal précédemment obtenu est jusqu'à 25% plus tenace que la référence 3D périodique et rigide ("octet-truss") à la même densité. Finalement, une étude portant sur les propriétés de résistance à la fracture en compression vient compléter ce travail, en montrant en particulier que l'effet du désordre sur des réseaux initialement périodiques est bénéfique à faible densité d'une part et que le réseau 3D amorphe et l'octet-truss présentent des limites élastiques très proches dominée par le flambage de leurs éléments d'autre part.

**Title:** Mechanics of disordered truss metamaterials: towards a new bone-inspired isotropic, stiff, tough and light microlattice.

**Keywords:** microlattice, disorder, metamaterial, additive manufacturing, elasticity, fracture

**Abstract:** The search for new materials that are both lightweight and mechanically strong is a major challenge in the context of the reduction of greenhouse gases emissions, particularly in the transportation sector. The recent emergence of additive manufacturing has paved the way for the design and manufacture of new materials. By allowing greater freedom in the arrangement of matter, this technology has notably given rise to microlattices (2011), a judiciously chosen arrangement of clamped hollow microbeams. By lightening the whole structure thanks to a very high structural porosity, it is possible to reach relative densities of the order of 0.1% (close to those of aerogels) while offering a rigidity several orders of magnitude higher than materials of equivalent density.

This thesis positions itself in the wake of this approach and proposes to study the effect of architectural disorder on the mechanical properties of beam lattices. It is divided into two parts, both based on a numerical modeling approach supplemented by experiments on 3D-printed samples. In the first part, we present the effect of disorder on the elasticity of microlattices. In particular, we show in a simple model of 2D beam networks that gradually introduced disorder downgrades slightly the elastic properties of rigid networks (dominated by a tension/compression behaviour).

Taking advantage of these first results, we propose another way to create disordered, rigid and isotropic 3D microlattices and show that our architecture reaches an optimum in terms of stiffness-to-density ratio. Finally, the developed numerical model allows us to explore more exotic architectures: metanacres (composites based on microlattices whose microstructure mimics that of mother-of-pearl) and prediction/optimization of 2D networks via machine learning algorithms.

The second part focuses on fracture properties in tension and compression. First, the effect of disorder in 2D lattices is to produce within the sample a large statistical variability on the fracture toughness calculated using the linear elastic fracture mechanics framework. Numerical simulations show that the previously obtained amorphous and optimal 3D micro-lattice is up to 25% tougher than the periodic and rigid 3D reference (octet-truss) at the same density. Finally, a study on the fracture resistance properties in compression completes this work, showing in particular that the effect of disorder on initially periodic networks is beneficial at low density on the one hand and that the amorphous 3D network and the octet-truss exhibit very close elastic limits dominated by the buckling of their elements on the other hand.