

**Thesis title:** Uncertainty-based optimization of architected materials structures for high energy absorption applications.

**Host Laboratory:** Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne UMR CNRS 6303, Univ. Bourgogne Franche Comté (UBFC), UTBM - Département CO2M, Site de Sévenans, 90010 Belfort cedex.

**Speciality:** Engineering Sciences and Microtechnics, option: Mechanics .

**Keywords:** Optimization under uncertainty, additive manufacturing, architectural materials, mechanical modeling, dynamic characterization, bio-inspired cellular structures.

### Descriptif détaillé de la thèse / Job description

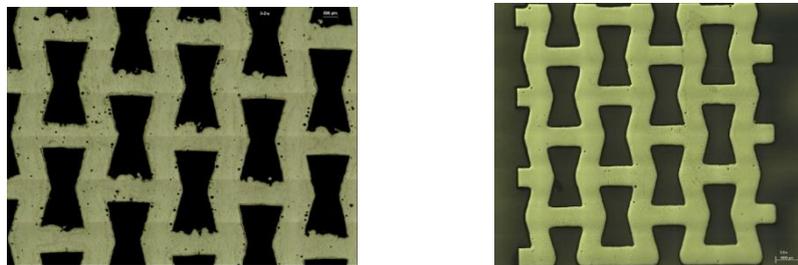
Additive manufacturing refers to all processes that allow the production of parts by sequential deposition of material. Unlike conventional manufacturing processes, this process allows the design of very complex geometric structures while promoting a lighter structure, combined with a significant gain in terms of manufacturing time and base material, by eliminating intermediate stages of material forming.

Thanks to additive manufacturing, it is possible to design new complex lattice structures, combining one or more input materials, whose characteristics can cover several applications such as biomedical (manufacture of active stents and femoral prostheses for example), transportation, military, and even sports. These structures consist of a large number of beams or ligaments arranged in a pattern to form a unit cell also called Lattice and which can offer new performances in terms of mechanical behavior, energy dissipation, and/or thermal and acoustic transfer.

In terms of security and protection of the physical integrity of people, the high energy absorption capacity of these architectural structures combined with an optimized weight reduction, offers new perspectives, mainly in the design of armor and shock-absorbing structures. The research project will be developed around this application

Additive manufacturing technology requires multidisciplinary knowledge and skills not only in computer-aided design to create these geometries but also in materials science, modeling, numerical simulation, and optimization to ensure the required part quality.

Furthermore, as discussed in the literature, the operating parameters of an AF process, such as the printing direction and strategy, the laser energy density, the printing speed, and the scan distance between two successive layers of material, significantly influence the macroscopic behavior of the printed material and consequently the lattice structure. These process parameters also influence the final quality of the obtained part (porosity rate, roughness/surface finish), as well as on the geometrical accuracy of the model, and require



an adequate optimization, see Figure 1.

Figure 1: Shape defects and porosity distribution as a function of printing parameters, exposure time, laser power, and printing direction, etc.

From a numerical point of view, the non-stochastic and heterogeneous layout and distribution of the lattice structures, according to their densities and thicknesses, allows to control and customize their

mechanical properties. Similarly, the integration of multi-material structures in a bio-mimetic context allows improving the energy absorption capacity of these structures.

However, this approach complicates the optimization process and requires a very advanced management of geometry and parameterization. Finding the optimal distribution remains a tedious task of numerical trial and error in order to find the optimal combination. For this, we propose in this research project to integrate and couple the optimization algorithms developed in the laboratory with numerical models to find the optimal configuration for these structures to allow, in addition to their lightness, to absorb large amounts of energy as during a ballistic shock.

The relevance of a finite element model and its predictive capability depend strongly on the accuracy of the input parameters, especially the material parameters and the geometry. These parameters are often considered as deterministic in the parts produced by conventional processes, whereas in reality they are subject to uncertainties. These variabilities, generated on the one hand by the process parameters themselves and by geometric dispersions on the other hand, are more important in the case of parts produced by the additive manufacturing process and can have harmful consequences if they are not taken into account from the modeling phase. The propagation of these uncertainties can considerably affect the structures produced and their rigidities.

In order to identify the mechanical properties of the printed material, experimental investigation campaigns will be conducted for static and fast dynamic loading cases (mainly in compression and shear). This will allow to identify the parameters of the behavior laws under these uncertainties.

The probabilistic approach is commonly used for modeling uncertainties in structural optimization problems. The probability density and the distribution function are used to define the occurrence of certain stochastic quantities that are uncertain in nature. The statistical description of a random variable  $X$  can be given either by the distribution function or by the probability density and characterized by the mean and the variance. The Normal, Lognormal and Weibull distributions are the usual distributions used to model these quantities. The greatest difficulty is to characterize these random parameters. This requires a large number of trials.

However, replacing the expensive problem with an equivalent one using meta-modeling techniques seems to be a technique to overcome these computational time problems and it is one of the objectives of this research topic.

To overcome the computationally intensive time required for the analysis and simulation of solid lattice structures and the consideration of the uncertainties, the thesis, which will be conducted in partnership with Mohamed Slim BAHY and Christophe CZARNOTA (from LEM3, University of Lorraine), will include several points:

- \* Carry out a state of the art on architectural materials, micro and macro numerical simulation models, on uncertain optimization.
- \* Define parameterization strategies to control the arrangement and density of Lattice structures in the room.
- \* Create numerical models (finite elements) solid and beam for the simulation of loading cases (static and dynamic).
- \* Carry out an experimental manufacturing and characterization campaign (quasi-static and dynamic).
- \* Optimize with uncertainties.

**Profile required:**

**Preferred selection criteria:**

This thesis is aimed at students at the end of their engineering or master's degree, the candidate should be a good mechanic combining knowledge of solid mechanics, materials and processes, as well as good skills in the use of numerical simulation tools (finite elements), and optimization and with a practical sense for experimental implementation.

A good knowledge of polymer/metal additive manufacturing processes will be welcome, as well as a practical sense for experimental implementation.

**Personal characteristics:**

seriousness, rigor, spirit of synthesis and teamwork.

**Financement : MESRI Etablissement**

Dossier à envoyer pour le **20/05/2022**

Début du contrat : 1<sup>er</sup> Octobre 2022

Salaire mensuel brut : 1975€

**Direction de la thèse:/ Thesis Supervisor**

M. Nadhir LEBAAL, email : [nadhir.lebaal@utbm.fr](mailto:nadhir.lebaal@utbm.fr), tél : +33 6 49 85 70 39

**Encadrement de la thèse : co-directeur(s) et co-encadrant(s)**

M. Sébastien ROTH, **co-directeur**, email : [sebastien.roth@utbm.fr](mailto:sebastien.roth@utbm.fr)

M. Frederic Demoly, **co-encadrant**, email: [frederic.demoly@utbm.fr](mailto:frederic.demoly@utbm.fr)

M. Mohamed Slim Bahi", **co-encadrant**, email: [mohamed-slim.bahi@univ-lorraine.fr](mailto:mohamed-slim.bahi@univ-lorraine.fr)

Applicants are invited to submit their application to the PhD supervisors.

Application must contain the following documents:

- CV
- Cover letter
- At least 1 reference letter

**Titre de la thèse :** Optimisation sous incertitudes de structures en matériaux fonctionnelles pour des applications à haute capacité d'absorption d'énergie.

**Laboratoire d'accueil :** Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne UMR CNRS 6303, Univ. Bourgogne Franche Comté (UBFC), UTBM - Département CO2M, Site de Sévenans, 90010 Belfort cedex.

**Spécialité du doctorat préparé :** Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques, option Mécanique

**Mots-clefs :** Optimisation sous incertitudes, fabrication additive, matériaux architecturés, modélisation numérique, caractérisation en dynamique, structures cellulaires bio-inspirées.

### Descriptif détaillé de la thèse :

La fabrication additive désigne l'ensemble des procédés permettant la réalisation des pièces par déposition séquentielle de matière. Contrairement aux procédés de fabrication classiques, ce procédé permet de concevoir des structures géométriques très complexes tout en favorisant un allègement de structure, combiné à un gain important en termes de temps de fabrication et en matériau de base, par la suppression des étapes intermédiaires de mise en forme.

Grâce à la fabrication additive, il est possible de concevoir de nouvelles structures en treillis complexes, en combinant un ou plusieurs matériaux d'apport, dont les caractéristiques peuvent couvrir plusieurs applications telles que le biomédical (fabrication des stents actifs et des prothèses fémorales par exemple), le transport, le militaire et même le domaine sportif. Ces structures consistent en un grand nombre de poutres ou ligaments disposés en motif pour former une cellule unitaire appelée aussi Lattice et qui peuvent offrir de nouvelles performances en termes de comportement mécanique, de dissipation de l'énergie, et/ou de transfert thermique et acoustique.

En matière de sécurité et de protection de l'intégrité physique des personnes, la grande capacité d'absorption d'énergie de ces structures architecturées combinée à un allègement optimisé de la masse, offre de nouvelles perspectives, principalement dans la conception des blindages et des structures amortissantes de chocs. Le projet de recherche sera développé autour de cette application.

La technologie de fabrication additive requiert une connaissance et des compétences pluridisciplinaires non seulement en conception assistée par ordinateur, permettant de créer ces géométries, mais aussi en science des matériaux, en modélisation, en simulation numérique et en optimisation afin de garantir la qualité requise des pièces.

De plus, comme il a été question dans la littérature, les paramètres opératoires d'un procédé de FA, tels que la direction et la stratégie d'impression, la densité d'énergie du laser, la vitesse d'impression et la distance de scan entre deux couches de matière successives, influencent considérablement le comportement macroscopique du matériau imprimé et par conséquent celui de la structure lattice. Ces paramètres process ont également une influence sur la qualité finale de la pièce obtenue (taux de porosité, rugosité/état de surface), ainsi que sur la précision géométrique du modèle et nécessite par ailleurs une optimisation adéquate,



voir Figure 1.

Figure 1 : défauts de forme et répartition des porosités en fonction des paramètres d'impression ; - Temps d'exposition, - puissance du laser et le sens d'impression.

D'un point de vue numérique, la disposition et la distribution non stochastique et hétérogène des structures lattices, en fonction de leurs densités et épaisseurs, permettent de contrôler et de personnaliser leurs propriétés mécaniques. De même, l'intégration des structures multi matériaux dans un contexte de bio mimétisme permet d'améliorer la capacité d'absorption d'énergie de ces structures.

Cependant, cette démarche complique le processus d'optimisation et nécessite une gestion très avancée de la géométrie et du paramétrage. Trouver la distribution optimale, reste un fastidieux travail d'essais erreurs numériques afin de trouver la combinaison optimale. Pour cela, nous proposons dans ce projet de recherche d'intégrer et coupler les algorithmes d'optimisation développés au laboratoire avec les modèles numériques pour trouver à moindre coût la configuration optimale pour que ces structures permettent, en plus de leurs allègements, d'absorber des quantités d'énergie importantes comme lors d'un choc balistique.

La pertinence d'un modèle éléments finis et sa capacité de prédiction dépendent fortement de la précision des paramètres d'entrées, notamment les paramètres matériaux et la géométrie. Ces paramètres sont souvent considérés dans les pièces réalisées par les procédés conventionnels comme déterministes alors qu'en réalité ils sont entachés d'incertitudes. Ces variabilités, engendrées d'une part par les paramètres process eux-mêmes et par les dispersions géométriques d'autre part, sont plus importantes dans le cas des pièces produites par le procédé de fabrication additive et peuvent avoir des conséquences néfastes si elles ne sont pas prises en compte dès la phase de modélisation. La propagation de ces incertitudes peut affecter d'une manière considérable les structures réalisées et leurs rigidités.

Afin d'identifier les propriétés mécaniques du matériau imprimés, des campagnes d'investigations expérimentales seront menées pour des cas de chargements en statique et en dynamique rapide (principalement en compression et en cisaillement). Ce qui permettrait à terme, d'identifier les paramètres de lois de comportement sous ces incertitudes.

L'approche probabiliste est couramment utilisée pour la modélisation d'incertitudes dans des problèmes d'optimisation des structures. La densité de probabilité et la fonction de répartition sont utilisées pour définir l'occurrence de certaines quantités stochastiques incertaines par nature. La description statistique d'une variable aléatoire  $X$  peut être donnée soit par la fonction de répartition ou par la densité de probabilité et caractérisée par la moyenne et la variance. Les lois Normale, Lognormal et Weibull sont les lois usuelles utilisées pour modéliser ses quantités. La plus grande difficulté est de caractériser ces paramètres aléatoires. Ceci nécessite un grand nombre d'essais.

Cependant, le remplacement du problème couteux par un problème équivalent en utilisant les techniques de méta-modèle semble une technique permettant de remédier à ces problèmes de temps de calcul et c'est un des objectifs de ce sujet de recherche.

Afin de surmonter les problèmes de temps de calcul intensif nécessaire pour l'analyse et la simulation des structures en treillis solides en prenant en compte les incertitudes, cette thèse, en collaboration avec Mohamed Slim BAHY et Christophe CZARNOTA (LEM3, Université de Lorraine), comportera plusieurs points :

- ✓ Réaliser un état de l'art sur les matériaux architecturés, les modèles de simulation numérique micro et macro, sur l'optimisation incertaine.
- ✓ Définition de stratégies de paramétrage afin de bien contrôler l'arrangement et la densité des structures Lattices dans la pièce.
- ✓ Création de modèles numériques (éléments finis) solide et poutre pour la simulation des cas de chargement (statique et dynamique).
- ✓ Réaliser une campagne expérimentale de fabrication et de caractérisation (en quasi-statique et en dynamique).
- ✓ Optimisation avec prise en compte d'incertitudes.

### **Profil demandé :**

Cette thèse s'adresse aux étudiants en fin de cursus d'Ingénieur ou Master, le candidat devra être un bon mécanicien associant à la fois des connaissances de mécanique des solides, matériaux et procédés, ainsi que de bonnes aptitudes à la mise en œuvre des outils de simulation numérique (éléments finis), et d'optimisation et avec un sens pratique pour la mise en œuvre expérimentale.

Une bonne connaissance des procédés de fabrication additive polymère/métallique sera bienvenue, ainsi qu'un sens pratique pour la mise en œuvre expérimentale.

**Direction de la thèse:/ Thesis Supervisor**

M. Nadhir LEBEAL, email : [nadhir.lebaal@utbm.fr](mailto:nadhir.lebaal@utbm.fr), tél : +33 6 49 85 70 39

**Encadrement de la thèse : co-directeur(s) et co-encadrant(s)**

M. Sébastien ROTH, **co-directeur**, email : [sebastien.roth@utbm.fr](mailto:sebastien.roth@utbm.fr)

M. Frederic DEMOLY, **co-encadrant**, email: [frederic.demoly@utbm.fr](mailto:frederic.demoly@utbm.fr)

M. Mohamed Slim BAH, **co-encadrant**, email: [mohamed-slim.bahi@univ-lorraine.fr](mailto:mohamed-slim.bahi@univ-lorraine.fr)

**Candidatures :**

Les dossiers de candidatures (CV+ relevés de notes + lettres de candidature) sont à envoyer à l'équipe encadrante.

**Financement : MESRI Etablissement**

Dossier à envoyer pour le **20/05/2022**

Début du contrat : 1<sup>er</sup> Octobre 2022

Salaire mensuel brut : 1975€