



## Avis de Soutenance

Monsieur Emile LIBOUTET

Présentera ses travaux en soutenance

Soutenance prévue le **vendredi 13 janvier 2023** à 9h30  
Lieu : UTBM - Site de Sévenans Rue de Leupe, 90400 Sevenans  
Salle : P228

Titre des travaux : Fabrication additive de composants pour l'énergie nucléaire

Ecole doctorale : SPIM - Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques

Section CNU : 28

Unité de recherche : Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne

Directeur de thèse : Sophie COSTIL

Codirecteur de thèse : Christophe VERDY  HDR  NON HDR

Soutenance :  Publique  A huis clos

Membres du jury :

<u>Nom</u>	<u>Qualité</u>	<u>Etablissement</u>	<u>Rôle</u>
Mme Sophie COSTIL	Professeur des universités	Université Bourgogne - Franche-Comté	Directrice de thèse
M. Christophe VERDY	Ingénieur de recherche	Université Bourgogne - Franche-Comté	Co-directeur de thèse
M. Bertrand STEPNIK	Directeur du service R&D Framatome	Framatome CRIL	Co-encadrant de thèse
M. Bernard NORMAND	Professeur des universités	INSA Lyon	Examineur
M. Pascal MOGNOL	Professeur des universités	École normale supérieure de Rennes	Examineur
M. Frédéric BERNARD	Professeur des universités	Université de Bourgogne, Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne	Examineur
M. Philippe BERTRAND	Professeur des universités	Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Étienne	Rapporteur
M. Olivier TOUGAIT	Professeur des universités	Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Lille	Rapporteur

**Mots-clés** : Impression 3D,LBS,LBM,Projection à Froid,

## Résumé de la thèse (en français) :

Framatome est un des leaders mondiaux de l'industrie nucléaire. Son cœur de métier est la fabrication de réacteurs nucléaires et de combustibles nucléaires. Parmi le parc de réacteurs, principalement deux catégories se distinguent : les réacteurs de puissance et les réacteurs de recherche. Les réacteurs de recherche sont des mini réacteurs nucléaires utilisés par les universités et les centres de recherche qui servent à la formation, la recherche, le développement des composants des réacteurs de puissance, la fabrication de neutrons pour des expériences scientifiques, l'irradiation de matériaux pour l'industrie et la fabrication de radio-isotope pour le domaine médical. Il est nécessaire que leurs combustibles soient denses en uranium afin de d'entretenir les réactions nucléaires et maximiser leur rendement. Le programme RERTR (Reduced Enrichment for Research and Test Reactors), mis en place en 1978, poursuit l'objectif d'optimisation de la densité en uranium fissile des combustibles de réacteurs de recherche pour pallier la réduction de l'enrichissement de 93% à 20% en  $^{235}\text{U}$ . Après avoir développé de nouveaux alliages à plus forte densité, d'autres recherches sont alors mises en place afin de permettre l'amélioration des cœurs par divers moyens. Une des voies possibles est de travailler sur la géométrie du cœur de plaque. Les techniques actuelles de fabrication de plaques de combustibles nucléaires de recherche sont le laminage et l'extrusion à partir de poudres d'uranium métallique compactées à froid. Ces deux technologies ont trois principales limitations. Tout d'abord, elles imposent aux plaques d'avoir des géométries de cœur planes ou cylindriques alors que la géométrie des réactions nucléaires est plutôt sphérique et dictée par les fuites et la modération des neutrons dans le cœur du réacteur. Ensuite, ces technologies sont basées sur de grandes déformations. Le cœur de plaque en uranium est en effet dilué dans une matrice ductile en aluminium pour permettre cette déformation tout en restant dans le domaine élastique. Le pourcentage d'aluminium ajouté dans le cœur est d'environ 40% en masse. Enfin, les grandes déformations appliquées lors du laminage ou de l'extrusion induisent des vagues de déformation sur le cœur de plaque et ainsi la formation de surépaisseurs sur le cœur de plaque. Elles sont compensées par la diminution de l'épaisseur du cœur de plaque en uranium de près de 20%. L'ensemble de ces contraintes technologiques induisent une perte de masse en uranium de près d'un facteur deux dans le cœur de plaque. Le changement de technologie pourrait permettre de s'affranchir de ces limitations. Les plaques combustibles des réacteurs nucléaires de recherche sont des objets à haute valeur ajoutée, de petite taille (typiquement  $1000 \times 60 \times 1.3$  mm), fabriqués en petite série, non standardisés, avec de nombreux designs différents et utilisant des poudres métalliques. Ces caractéristiques sont parfaites pour la fabrication additive. De plus, les améliorations actuelles recherchées sont l'optimisation géométrique avec des géométries plus complexes que celles actuellement possibles. Ces avantages sont là aussi typiquement ceux de la fabrication additive. Nous avons donc un cas d'usage qui semble bien adapté à la fabrication additive. Cependant, il existe une difficulté de taille. La poudre métallique d'uranium utilisée est radioactive et inflammable dans l'air. Elle nécessite d'être manipulée en boîte à gant ce qui complexifie la mise en œuvre des technologies de fabrication additive. C'est précisément pour répondre à ces exigences qu'un projet de recherche est né entre l'entreprise Framatome et l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard afin d'étudier les procédés de fabrication additive susceptibles de fabriquer des plaques de combustible nucléaire de recherche. Deux procédés de fabrication additive ont été sélectionnés et expérimentés : La projection Cold Spray et la micro fusion sur lit de poudre.

## Abstract (in English):

Framatome is one of the world leaders in the nuclear industry. Its main business is the manufacture of nuclear reactors and nuclear fuels. All the reactors can be divided in two main categories: power reactors and research reactors. Nuclear research reactors are small nuclear reactors used by universities and research centers. Their purposes are training, research, development of power reactor components, production of neutrons for scientific experiments, irradiation of materials for industry and manufacture of radioisotopes for the medical field. Since nuclear research reactors are small, their fuels must be dense in uranium to sustain nuclear reactions and maximize their yield. The RERTR program (Reduced Enrichment for Research and Test Reactors), set up in 1978, pursues the objective of optimizing the fissile uranium density of research reactor fuels to offset the 93% reduction in enrichment to 20% in  $^{235}\text{U}$ . After having developed new alloys with higher density, other research is then put in place to allow the improvement of the cores by various means. One of the possible ways is to work on the geometry of the plate core. Current techniques for manufacturing research nuclear fuel plates are rolling and extrusion from cold-compacted metallic uranium powders. These two technologies have three main limitations. First, they require the plates to have planar or cylindrical core geometries whereas the geometry of nuclear reactions is rather spherical and dictated by neutron leakage and moderation in the reactor core. Then, these technologies are based on large deformations. The core of the uranium plate

is indeed diluted in a ductile aluminum matrix to allow this deformation while remaining in the elastic domain. The percentage of aluminum added in the core is about 40% by mass. Finally, the large deformations applied during rolling or extrusion induce waves of deformation on the plate core and thus the formation of extra thicknesses on the plate core. They are compensated by the reduction in the thickness of the uranium plate core by almost 20%. All these technological constraints induce a loss of  $^{235}\text{U}$  mass by a factor of two in the plate core. The change in technology could make it possible to overcome these limitations. The fuel plates of nuclear research reactors are objects with high added value, of small size (typically 1000 x 60 x 1.3 mm), produced in small series, not standardized, with many different designs and using metal powders. These features are perfect for additive manufacturing. In addition, the current improvements sought are geometric optimization with more complex geometries than those currently possible. These advantages are again typically those of additive manufacturing. So, we have a use case that seems well suited to additive manufacturing. However, there is a major difficulty. The uranium metal powder used is radioactive and flammable in air. It needs to be handled in a glove box, which complicates the implementation of additive manufacturing technologies. It is precisely to meet these requirements that a research project was born between the company Framatome and the University of Technology of Belfort-Montbéliard to study the additive manufacturing processes likely to manufacture nuclear fuel plates of research. Two additive manufacturing processes were selected and tested: Cold Spray and Laser Beam Melting.