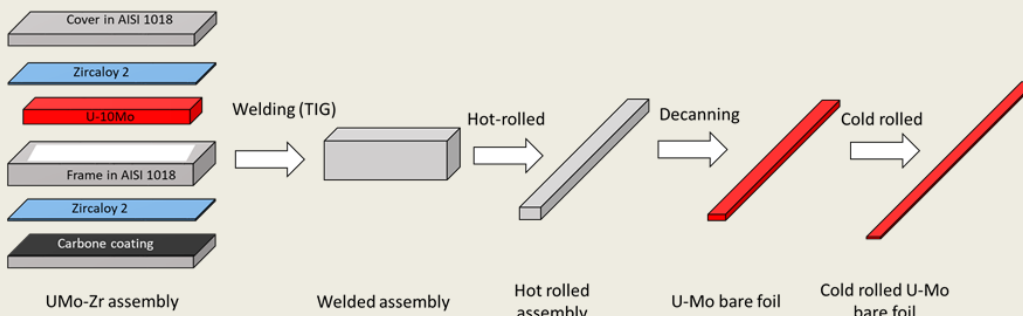
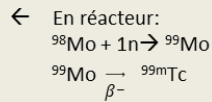


<p>TITRE</p>	<p>Caractérisation thermomécanique d'un alliage uranifère destiné aux réacteurs nucléaires de recherche en physique des matériaux et à la médecine nucléaire</p>
<p><i>Acronyme du projet</i></p>	<p>MOLAU (MOdélisation du Laminage d'alliages Uranifères)</p>
<p>Modalités d'encadrement, de suivi de la formation et d'avancement des recherches du doctorant</p>	<p>La thèse est rattachée à l'école doctorale SMRE (Science de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement) rattaché à l'université de Lille. En accord avec l'Ecole Doctorale :</p> <ul style="list-style-type: none"> - en 1^{ère} année, rapport et soutenance bibliographique (Février) - en 1^{ère} année, réunion du Comité de Suivi Individuel de Thèse (Juin-Juillet), puis annuellement. <p>Les travaux feront l'objet d'échanges constants entre le doctorant, l'équipe encadrante et l'entreprise, et de réunions formelles trimestrielles avec fourniture préalable de documents et rédaction de comptes-rendus a posteriori. Pour l'entreprise :</p> <ul style="list-style-type: none"> - En fin de première année, rapport d'avancement (décembre) - En fin de 2^{ème} année, rapport d'avancement (décembre) - En fin de 3^{ème} année ou fin de thèse, rapport d'avancement et manuscrit de thèse (décembre)
<p><i>Objectif général</i></p>	<p>L'objectif applicatif est la caractérisation des propriétés thermomécaniques et microstructurales de l'alliage U-10%Mo et du combustible nucléaire U-10%Mo monolithique. Les caractérisations de l'alliage permettront d'alimenter une modélisation du procédé de laminage et les caractérisations du combustible produit permettront de vérifier l'adéquation du modèle avec les expériences. La thèse s'inscrit dans un projet plus vaste qui comprend la réalisation d'une autre thèse de modélisation en parallèle de celle-ci, avec une coordination à établir, et des tests de fabrication des produits faites par l'industriel. La thèse est aussi réalisée dans le cadre du programme EU CONVERSION qui regroupe 5 instituts de recherche européens et qui est financée par l'union européenne (EURATOM) afin de soutenir les activités de non-prolifération nucléaire en Europe.</p>
<p>Présentation détaillée</p>	<p>Les plaques uranifères destinées aux réacteurs nucléaires de recherche en physique ou aux applications médicales sont constituées d'un cœur radioactif à base de ²³⁵U enrichi à moins de 20%, sous forme d'un alliage U-10%Mo. Leur fabrication s'effectue en deux étapes [1] : (1) la fabrication d'une feuille U-10%Mo revêtue de Zr et (2) le scellement de l'ensemble dans un gainage aluminium pour former les plaques. Les plaques sont ensuite assemblées dans un ou plusieurs éléments qui composeront le cœur du réacteur nucléaire de recherche (figure 2). Le projet MOLAU se concentre sur les caractérisations et la modélisation de la première étape qui se fait par co-laminage à chaud d'un assemblage Zr/U-Mo/Zr dans un boîtier acier (cf. figure 1).</p>  <p style="text-align: center;">Figure 1 : Schéma de fabrication de feuilles U-10%Mo revêtues Zr</p>



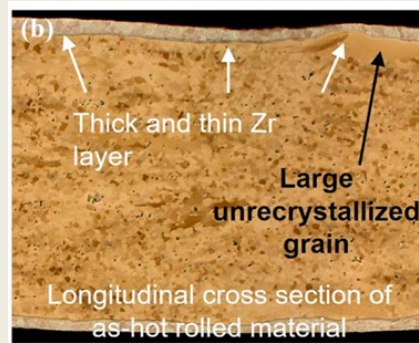
- Génie nucléaire:
 extraction de $^{99\text{m}}\text{Tc}$
 (émetteur γ)

Insertion de la source γ
 dans un scanner
 de scintigraphie →



Figure 2 : Application à la fabrication du radio-traceur $^{99\text{m}}\text{Tc}$. A gauche : Cœur du réacteur nucléaire FRMII dans lequel sont montées les plaques. A droite : un scanner de scintigraphie.

Sa modélisation est souhaitée pour fiabiliser le processus de conception et de fabrication du combustible [2,3]. L'enjeu principal est de matérialiser de manière précise et efficace la co-déformation plastique des trois alliages en contact. Comme dans tout procédé de mise en forme de plusieurs alliages de propriétés mécaniques différentes, le produit peut présenter plusieurs types de défauts : formes d'extrémités, irrégularités d'épaisseur, striction ou rupture de cœur, planéité... De plus, pour éviter la formation de pièges à gaz de fission générateurs de gonflement anisotrope, une microstructure homogène à grains fins est nécessaire pour un bon fonctionnement en réacteur, ainsi qu'une bonne adhésion des interfaces Zr/U-10%Mo. Tout écart à ces spécifications est susceptible de conduire à des hétérogénéités d'échauffement préjudiciables au bon fonctionnement du réacteur.



Défaut d'ogive en extrémité irrégularité d'épaisseur du cœur / striction

(<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103910>)

Figure 3 : Représentation schématique de défauts de forme des plaques.

L'objectif des travaux de thèse est donc de réaliser les caractérisations des propriétés de l'alliage U-10%Mo :

- Mécanique : compression, traction entre 600 et 900°C
- Thermique : capacité thermique, dilatation
- Microstructure : transformation de phase, recristallisation, taille de grains métallurgiques

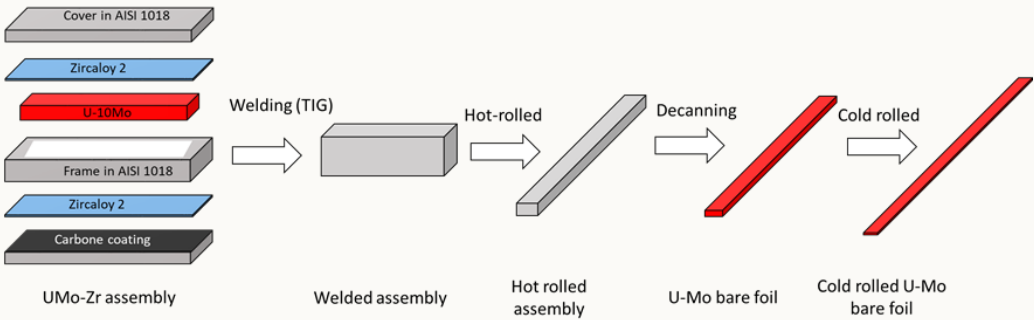
Ces caractérisations seront effectuées dans le domaine de sollicitation du matériau lors des processus de fabrication afin de comprendre son comportement et son évolution. Ces travaux seront effectués à l'Université de Lille et au CRIL (Romans-sur-Isère). Ils seront comparés à ceux obtenus par d'autres laboratoires internationaux. Il est en particulier prévu de faire un round robin sur les mesures de conductivité thermique avec 3 autres laboratoires Européens membres du programme EU CONVERSION (SCK-CEN, CEA, TUM).

Une deuxième partie du travail consistera à caractériser les produits et sous-produits issus de la fabrication du combustible U-10%Mo monolithique afin de les comparer aux modélisations faites dans le cadre du projet MOLAU. Ces caractérisations, destructives et non destructives, permettront de mesurer la géométrie, la microstructure et la composition chimique obtenues.

Les points saillants des travaux seront donc :

	<ul style="list-style-type: none"> - une bibliographie exhaustive des propriétés mécaniques, thermiques et microstructurales de l'U-10%Mo et des moyens pour les mesurer ; - des mesures des propriétés mécaniques, thermiques et microstructurales de l'U-10%Mo ; - la mise au point d'une méthodologie de comparaison modèle et expérience ; - une campagne de validation expérimentale. <p>Les résultats ainsi obtenus devront aboutir à la connaissance du matériau, de sa mise en forme et des écarts modèle / expérience.</p>
Références	<p>[1] K. Buducan: Development of European manufacturing process for bare U-Mo monolithic foils. PhD thesis, TU München, 2023</p> <p>[2] G. Cheng, X. Hu, W.E. Frazier, C.A. Lavender, V.V. Joshi : Effect of second phase particles and stringers on microstructures after rolling and recrystallization, Mat. Sci. & Engg A736 (2018) 41-52</p> <p>[3] W.E. Frazier, K. Kalia, C. Wang, K.S. Choi, D.P. Field, S. Hu, A. Soulami, V.V. Joshi: An Integrated Simulation of Multiple-Pass U-10Mo Alloy Hot Rolling and Static Recrystallization, Met. Mat. Trans. 54A (2023) 3461-3475</p> <p>[4] L. Li, A. Fortier, D. Ramirez-Tamayo, V.V. Joshi, A. Soulami : Minimizing thickness variation in monolithic U-10Mo fuel foil and Zr interlayer during hot rolling: a microstructure-based FEM analysis, Mat. Today Comm. 32 (2022) 103910</p> <p>[5] Vineet V. Joshi, Eric A. Nyberg, Curt A. Lavender, Dean Paxton, Hamid Garmestani, Douglas E. Burkes : Thermomechanical process optimization of U-10 wt% Mo e Part 1: high-temperature compressive properties and microstructure, Journal of Nuclear Materials 465 (2015) 805-813</p> <p>[6] Jason Schulthess, Michael Heighes, Connor Michelich, Cynthia Adkins, M.Craig Marshall, Mitchell Plummer, FidelmaDi Lemma, Tammy Trowbridge, JamesI. Cole : Mechanical and Thermophysical properties of low enriched uranium-10wt% molybdenum rolled foils, Journal of Nuclear Materials 563 (2022) 153628</p>
Objectifs de valorisation des travaux de recherche du doctorant	<p>Rédaction d'articles</p> <p>Présentation dans des conférences internationales</p> <p>Le cas échéant, protection au titre de la Propriété Industrielle</p>
<i>Outils</i>	<p>Machine d'essais mécaniques en température ; Dureté</p> <p>Machines de tests thermiques (LFA, TMA, ATG-ATD)</p> <p>Microscope électronique à balayage (SEM, DX, EBSD)</p> <p>Microsonde de Castaing</p> <p>DRX</p>
Mots-clé	<p>U-10%Mo, combustible UMo monolithique, réacteur nucléaire de recherche, propriétés mécaniques, propriétés thermiques, propriétés thermomécaniques</p>
<i>Type projet/ collaboration</i>	<p>La thèse (CIFRE) est financée par FRAMATOME - CERCA.</p> <p>https://www.framatome.com/solutions-portfolio/fr/portefeuille/produit?ma=autres-secteurs-industriels&sol=secteur-de-la-sant&product=A1791</p>
Profil & compétences	<p>Science des matériaux</p> <p>Mécanique, Thermique ; Thermodynamique</p> <p>Motivation pour l'expérimentation</p> <p>Rigueur et capacité à s'investir pleinement dans un sujet</p> <p>Aptitude au travail en équipe</p> <p>Maitrise de la langue anglaise (niveau B2 minimum)</p>

Lieux	- Université de Lille (~50%) : 1 ^{ère} moitié de la thèse : Mesure des propriétés - FRAMATOME, site de Romans (~50%) : 2 ^{ème} moitié de la thèse : Expérimentations et mesures des produits
Equipe(s) de recherche	Equipe MPGM (Métallurgie Physique et Génie de Matériaux) de l'UMET (Unité Matériaux Et Transformations) à l'Université de Lille
Encadrant / Dir. de thèse	Franck Beclin, maître de conférences, franck.beclin@univ-lille.fr Matthieu Touzin, maître de conférences, matthieu.touzin@univ-lille.fr
Tuteur(s) entreprise	Bertrand Stepnik, Directeur de Recherche, FRAMATOME-CERCA bertrand.stepnik@framatome.com

TITLE	<i>Thermomechanical characterization of a uranium alloy intended for nuclear research reactors in materials physics and nuclear medicine</i>
Project acronym	MOLAU (MOdelling LAMination of Uranium alloys)
Global objective of work	<p>The aim of this thesis is to characterize the thermomechanical and microstructural properties of U-10%Mo alloy and U-10%Mo monolithic nuclear fuel. Characterization of the alloy will provide input for modeling the rolling process, while characterization of the fuel produced will enable us to check that the model is consistent with experiments.</p> <p>The thesis is part of a wider project involving another modeling thesis to be carried out in parallel with this one, with coordination to be established, and product manufacturing tests to be carried out by the manufacturer.</p> <p>The thesis is also part of the EU CONVERSION program, which brings together 5 European research institutes and is funded by the European Union (EURATOM) to support nuclear non-proliferation activities in Europe.</p>
Context	<p>Uranium-containing plates for physics research nuclear reactors or for nuclear medicine are made of a less-than-20% ²³⁵U-enriched radio-active core, in the form of a U-10%Mo alloy. They are formed in 2 steps [1]: (1) production of a Zr-coated U-10%Mo alloy foil and (2) welding of the foil in an Al can, to form the finished plates, which are then assembled in one or several elements which ultimately compose the core of the research nuclear reactor (figure 2).</p> <p>The MOLAU project focuses on characterizing and modeling the first stage, which involves hot co-lamination of a Zr/U-Mo/Zr assembly in a steel casing (see figure 1).</p> <p>Modeling aims to make the fuel manufacturing process more reliable [2,3]. The main challenge is to describe precisely and efficiently the plastic co-deformation of the three alloys in contact. As with any multi-metal co-forming process, the product may show several types of defects: out-of-specification end shape, thickness non-uniformity, core necking and fracture, waviness... Moreover, fission gas traps must be avoided as they would result in anisotropic swelling in reactor; otherwise, non-uniform warming in reactor would impair correct function. For this purpose, a fine-grain, homogeneous microstructure is needed, together with a good adhesion at the Zr/U-10%Mo interfaces. Any deviation from these specifications is likely to lead to heating heterogeneities detrimental to good reactor operation.</p>  <p style="text-align: center;">Figure 1: Production scheme of Zr-coated U-10%Mo foils</p>

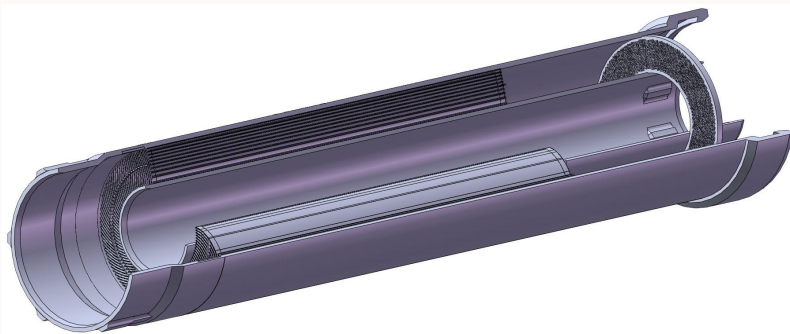
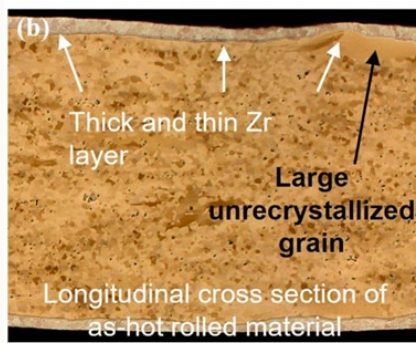


Figure 2: FRMII nuclear reactor core with the plates mounted in it



Ogive-shaped ends



radio-active core thickness non-uniformity

(<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103910>)

Figure 3: Schematic presentation of some of the plate shape defects.

The aim of the thesis work is therefore to characterize the properties of the U-10%Mo alloy:

- Mechanical: compressive and tensile tests between 600 and 900°C
- Thermal: Heat capacity, Thermal expansion coefficient
- Microstructure: phase transformation, recrystallization, metallurgical grain size.

These characterizations will be carried out in the material's stress range during manufacturing processes, in order to understand its behavior and evolution. This work will be carried out at the University of Lille and at CRIL (Romans-sur-Isère). They will be compared with those obtained by other international laboratories. In particular, a round robin on thermal conductivity measurements is planned with 3 other European laboratories involved in the EU CONVERSION program (SCK-CEN, CEA, TUM).

The second part of the project will involve characterizing the products and by-products resulting from the manufacture of monolithic U-10%Mo fuel, in order to compare them with the models produced as part of the MOLAU project. These characterizations will be destructive and non-destructive, in order to measure the geometry, microstructure and chemical composition obtained.

The highlights of the work will be:

- an exhaustive bibliography of the mechanical, thermal and microstructural properties of U-10%Mo and the methods to measure them;
- measurements of the mechanical, thermal and microstructural properties of U-10%Mo;
- development of a methodology for comparing model and experiment;
- an experimental validation campaign.

The results obtained should lead to a better understanding of the material, its shaping and model/experiment discrepancies.

References

- [1] K. Buducan: Development of European manufacturing process for bare U-Mo monolithic foils. PhD thesis, TU München, 2023
- [2] G. Cheng, X. Hu, W.E. Frazier, C.A. Lavender, V.V. Joshi: Effect of second phase particles and stringers on microstructures after rolling and recrystallization, *Mat. Sci. & Engg A736* (2018) 41-52

	<p>[3] W.E. Frazier, K. Kalia, C. Wang, K.S. Choi, D.P. Field, S. Hu, A. Soulami, V.V. Joshi: An Integrated Simulation of Multiple-Pass U-10Mo Alloy Hot Rolling and Static Recrystallization, <i>Met. Mat. Trans.</i> 54A (2023) 3461-3475</p> <p>[4] L. Li, A. Fortier, D. Ramirez-Tamayo, V.V. Joshi, A. Soulami : Minimizing thickness variation in monolithic U-10Mo fuel foil and Zr interlayer during hot rolling: a microstructure-based FEM analysis, <i>Mat. Today Comm.</i> 32 (2022) 103910</p> <p>[5] Vineet V. Joshi, Eric A. Nyberg, Curt A. Lavender, Dean Paxton, Hamid Garmestani, Douglas E. Burkes : Thermomechanical process optimization of U-10 wt% Mo e Part 1: high-temperature compressive properties and microstructure, <i>Journal of Nuclear Materials</i> 465 (2015) 805-813</p> <p>[6] Jason Schulthess, Michael Heighes, Connor Michelich, Cynthia Adkins, M.Craig Marshall, Mitchell Plummer, FidelmaDi Lemma, Tammy Trowbridge, Jamesl. Cole : Mechanical and Thermophysical properties of low enriched uranium-10wt% molybdenum rolled foils, <i>Journal of Nuclear Materials</i> 563 (2022) 153628</p>
<p><i>Objectives for promoting the doctoral student's research work</i></p>	<p>Articles writing Presentations at international conferences Industrial property protection, where applicable</p>
<p><i>Tools</i></p>	<p>Mechanical testing machine in temperature; Hardness Thermal testing machines (LFA, TMA, ATG-ATD) Scanning electron microscope (SEM, DX, EBSD) Electron microprobe X ray Diffraction</p>
<p><i>Key-words (separated by commas)</i></p>	<p>U-10%Mo, monolithic UMo fuel, research nuclear reactor, mechanical properties, thermal properties, thermomechanical properties</p>
<p><i>Project type/cooperation</i></p>	<p>The PhD is funded by FRAMATOME-CERCA, under an ANRT CIFRE Grant. https://www.framatome.com/solutions-portfolio/fr/portefeuille/produit?ma=autres-secteurs-industriels&sol=secteur-de-la-sant&product=A1791</p>
<p><i>Skills, abilities requested</i></p>	<p>Materials science Mechanics, Thermal properties; Thermodynamics motivation for experiments. Rigor, dedication to a subject, aptitude to teamworking. Mastering of the English language (B2 level minimum)</p>
<p><i>Location</i></p>	<p>- - Université de Lille (~50%): 1st half of thesis: Measurement of properties - FRAMATOME, Romans site (~50%): 2nd half of thesis: Product experiments and measurements</p>
<p><i>research team</i></p>	<p>MPGM team (Physical Metallurgy and Materials Engineering) of the UMET (Materials and Transformations Unit) at the University of Lille</p>
<p><i>Supervisor(s)</i></p>	<p>Matthieu Touzin, assistant professor, principal supervisor, matthieu.touzin@univ-lille.fr Franck Beclin, assistant professor, co-supervisor, franck.beclin@univ-lille.fr</p>
<p><i>Company tutor</i></p>	<p>Bertrand Stepnik, Research director, FRAMATOME-CERCA bertrand.stepnik@framatome.com</p>