

DEPARTEMENT PMDM : PROCÉDES METALLURGIE DURABILITE MATERIAUX

PROPOSITION THESE DE DOCTORAT

TITRE	Etude numérique et expérimentale de l'interaction conteneur/poudre métallique durant sa densification par compaction isostatique à chaud.
CONTEXTE	<p>Le doctorant intégrera l'axe PMDM du laboratoire ICB. Il effectuera ses travaux sur la Plateforme CALHIPSO (Compaction et Assemblage d'alliages métaLIques par HIP, une Solution InnOvante), sera rattaché à l'équipe LTm du Creusot, et travaillera en forte interaction avec l'équipe MANAPI de Dijon.</p> <p>CALHIPSO est un projet ambitieux de mise en œuvre de la technologie CIC (Compression Isostatique à Chaud) dans l'industrie métallurgique (aéronautique, défense, nucléaire...). Ce projet propose une approche globale d'expérimentation, de modélisation et de simulation qui permettra de définir des solutions CIC taillées à la mesure des besoins industriels.</p>
OBJECTIFS /DESCRIPTION	<p>La thèse s'organisera suivant trois volets.</p> <p>Le premier volet, plus appliqué, est directement relié à l'installation de la machine CIC au Creusot, et concerne plus particulièrement le choix optimal du conteneur dans le but de réaliser des pièces au plus proche des cotes, et ainsi répondre plus fidèlement aux exigences des industriels, notamment en termes de respect de la condition de distribution isostatique de la pression.</p> <p>Le second volet, plus fondamental, concerne la modélisation de la densification des poudres par CIC, en faisant le focus sur l'amélioration des modèles existants, analytiques et numériques, localement au voisinage entre le conteneur et la poudre compactée, là où les écarts sont les plus prononcés.</p> <p>Le troisième volet, plus expérimental, vise à utiliser différents moyens de fabrication additive pour produire des capsules étanches destinées au frittage de poudre par CIC.</p> <p>• Volet n°1 (optimisation du conteneur CIC)</p> <p>Les conteneurs étant souvent produits par fabrication mécanique (dont usinage), nous nous sommes récemment intéressés à leur fabrication par arc-fil à l'aide de la technologie WAAM¹. Cependant, cette technologie donne lieu à des microstructures différentes (taille de grains plus importante), génère de forts niveaux de contraintes résiduelles, et peut induire des problèmes de distorsion². Il est par conséquent difficile de respecter l'hypothèse de distribution isostatique de la pression telle qu'imposée par le procédé CIC. Il apparaît ainsi qu'une réflexion sur l'optimisation de la géométrie du conteneur semble d'un intérêt majeur pour répondre aux besoins des industriels à court terme^{3,4}. Il conviendrait, durant cette démarche d'optimisation, de se pencher en priorité sur le traitement des angles vifs et arêtes au niveau de l'enveloppe externe du conteneur.</p> <p>• Volet n°2 (modélisation de la densification par CIC à la frontière avec le conteneur)</p> <p>D'un point de vue analytique, les modèles macroscopiques sont les plus utilisés⁵, mais ils ne prennent pas en compte les spécificités morphologiques de la poudre, et surtout leur évolution durant le procédé CIC, poudre qui est considérée comme un milieu continu compressible, et dont il faut définir la loi de comportement⁶. Cela s'accompagne fatalement d'un point de vue numérique de difficultés en termes d'approche multi-échelle⁷.</p> <p>La prise en compte du conteneur dans le modèle numérique n'est pas systématique, et lorsqu'elle est réalisée, celle-ci est souvent partielle, implique un ralentissement de la densification au niveau des arêtes^{6,7}. Dans cette thèse, l'objectif se restreint au couplage multi-échelle entre approches macroscopique et mésoscopique, à la frontière entre conteneur et massif de poudre. A ce niveau, il conviendrait alors de se pencher sur les méthodes particulières (couplage FEM/DEM, FEM/SPH) qui ont montré leur efficacité pour les problèmes d'interface^{8,9}.</p>

	<p>• Volet n°3 (Fabrication additive de conteneurs étanches destinés à la CIC)</p> <p>Généralement, les conteneurs sont fabriqués par mécanosoudage. Dans le cas de pièces de formes complexes, nous avons montré que la technologie WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) est particulièrement adaptée¹. Néanmoins, elle présente un différentiel de taille de grains entre la capsule et le cœur (taille de grain élevée dans la paroi WAAM et plus fine dans la poudre frittée). Pour cette raison, il apparaît opportun de tester 2 autres technologies d'impression 3D, à savoir :</p> <ul style="list-style-type: none"> - WLAM : Wire Laser Additive Manufacturing (ICB PMDM) - Impression 3D : LYNXTER S600D (Pletforme3D) et DESKTOP-METAL (ICB CO2M) <p>Ces deux technologies devraient permettre un affinement de la microstructure dans la paroi du conteneur, ce qui pourrait éviter de devoir éliminer ce dernier (opération complexe et coûteuse). En particulier, avec ces deux imprimantes, le conteneur sera lui-même constitué de poudre frittée (de même nature), d'où potentiellement une absence de distinction entre le conteneur et la poudre.</p>
<p>Mots clefs :</p>	<p>CIC, conteneur, optimisation, méthodes particulières, fabrication additive</p>
<p>RESPONSABLE(S)</p>	<p>Co-encadrant de thèse : Mohamed Hatem ALLOUCHE, mohamed-hatem.allouche@u-bourgogne.fr Maître de Conférences, responsable de la halle CALHIPSO Directeur de thèse : Rodolphe BOLOT, rodolphe.bolot@u-bourgogne.fr Professeur des Universités, responsable de l'équipe LTm</p>
<p>MOYENS / LIEU</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Laboratoire ICB (Halle CALHIPSO – 12 rue de la Fonderie - 71200 Le Creusot), • Presse CIC du site Creusotin : QIH60-D415H1000-1400°C/2000bar, • Machine WLAM : Wire Laser Additive Manufacturing (ICB PMDM, Le Creusot), • 2 imprimantes 3D de type liant/poudre : LYNXTER S600D (Plateform3D, Le Creusot) et Desktop Metal (ICB CO2M, Belfort), • Moyens de calcul intensif du Centre de Calcul de l'Université de Bourgogne (CCUB), • Modèles thermomécaniques existants de l'équipe MANAPI (licence DS Simulia, uB), • Quelques séjours d'une semaine auprès de notre équipe de Birmingham sont prévus.
<p>PROFIL DU CANDIDAT(E)</p>	<p>Cette thèse s'adresse à des étudiant.e.s de Master Mécanique et/ou Matériaux et/ou Modélisation Numérique, motivés/ées, rigoureux/ses et méthodiques, avec des qualités et un goût certain pour la simulation numérique, les approches multiphysiques / multi-échelles, et le travail d'équipe.</p>
<p>REFERENCE</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. BOLOT, R., MATHIEU, A. & SIMON, M. Development of WAAM process: slicer, robot trajectories, and examples of parts. Preprint at https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2625492/v1 (2023). 2. Raut, L. P. & Taiwade, R. V. Wire Arc Additive Manufacturing: A Comprehensive Review and Research Directions. <i>J. Mater. Eng. Perform.</i> 30, 4768–4791 (2021). 3. Sobhani, S., Albert, M., Gandy, D., Tabei, A. & Fan, Z. Design Optimization of Hot Isostatic Pressing Capsules. <i>J. Manuf. Mater. Process.</i> 7, 30 (2023). 4. Chung, S. H., Park, H., Jeon, K. D., Kim, K. T. & Hwang, S. M. An Optimal Container Design for Metal Powder Under Hot Isostatic Pressing. <i>J. Eng. Mater. Technol.</i> 123, 234–239 (2001). 5. Abouaf, M., Chenot, J. L., Raison, G. & Bauduin, P. Finite element simulation of hot isostatic pressing of metal powders. <i>Int. J. Numer. Methods Eng.</i> 25, 191–212 (1988). 6. Van Nguyen <i>et al.</i> A combined model to simulate the powder densification and shape changes during hot isostatic pressing. <i>Comput. Methods Appl. Mech. Eng.</i> 315, 302–315 (2017). 7. Zouaghi, A. Étude de la compaction isostatique à chaud de l'acier inox 316L : Modélisation numérique à l'échelle mésoscopique et caractérisation expérimentale. (ENSM de Paris, 2013). 8. Ariane, M. <i>et al.</i> Discrete multi-physics: A mesh-free model of blood flow in flexible biological valve including solid aggregate formation. <i>PLOS ONE</i> 12, e0174795 (2017). 9. Jerier, J.-F. <i>et al.</i> Study of cold powder compaction by using the discrete element method. <i>Powder Technol.</i> 208, 537–541 (2011).

PMDM DEPARTMENT: PROCESS METALLURGY DURABILITY MATERIALS THESIS PROJECT PROPOSAL

TITLE	Numerical and experimental study of capsule/metal powder interaction during densification by hot isostatic pressing.
CONTEXT	<p>The PhD student will work in the PMDM department of the ICB laboratory. He or she will work on the CALHIPSO platform (Compaction et Assemblage d'alliages métalliques par HIP, une Solution InnOvante), will be attached to the LTm team at Le Creusot, and will work in close interaction with the MANAPI team at Dijon.</p> <p>CALHIPSO is an ambitious project to implement HIP (Hot Isostatic Pressing) technology in the metallurgical industry (aerospace, defence, nuclear, etc.). This project proposes a global approach to experimentation, modelling and simulation that will enable HIP solutions to be defined that are tailored to industrial needs.</p>
OBJECTIVES /DESCRIPTION	<p>The thesis will be organised into three parts.</p> <p>The first part, which is more applied, is directly linked to the installation of the HIP machine at Le Creusot, and more specifically concerns the optimal choice of the capsule with the aim of producing parts as close as possible to the dimensions, and thus meeting industrial requirements more faithfully, particularly in terms of compliance with the isostatic pressure distribution condition.</p> <p>The second, more fundamental, part concerns the modelling of the densification of powders by HIP, focusing on the improvement of existing analytical and numerical models, locally in the vicinity between the capsule and the compacted powder, where the differences are largest.</p> <p>The third part, which is more experimental, aims to use different additive manufacturing methods to produce sealed capsules for powder sintering by HIP.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stage 1 (optimisation of the HIP capsule) <p>As capsules are often produced by mechanical means (including machining), we have recently been interested in their manufacture by arc-wire using WAAM¹ technology. However, this technology gives rise to different microstructures (larger grain size), generates high levels of residual stress, and can induce distortion problems². It is therefore difficult to respect the assumption of isostatic pressure distribution as imposed by the HIP process. It would therefore seem that optimising the geometry of the capsule would be of major interest to meet the needs of manufacturers in the short term^{3,4}. During this optimisation process, priority should be given to the treatment of sharp angles and edges on the outer shell of the capsule.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stage 2 (modelling of densification by HIP at the capsule boundary) <p>From an analytical point of view, macroscopic models are the most widely used⁵, but they do not take into account the morphological specificities of the powder, and especially its evolution during the HIP process, a powder which is considered to be a continuous compressible medium, and whose behavioural law needs to be defined⁶. From a numerical point of view, this inevitably leads to difficulties in terms of a multi-scale approach⁷.</p> <p>Taking the capsule into account in the numerical model is not systematic, and when it is done, it is often partial, implying a slowdown in densification at the edges^{6,7}. In this thesis, the objective is limited to multi-scale coupling between macroscopic and mesoscopic approaches, at the boundary between capsule and powder mass. At this level, it would then be appropriate to look at particulate methods (FEM/DEM coupling, FEM/SPH) which have shown their effectiveness for interface problems^{8,9}.</p>

	<ul style="list-style-type: none"> • Stage 3 (Additive manufacturing of watertight capsules for the HIP) <p>Capsules are generally manufactured by mechanized welding. In the case of parts with complex shapes, we have shown that WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) technology is particularly suitable¹. However, there is a grain size differential between the capsule and the core (high grain size in the WAAM wall and finer grain size in the sintered powder). For this reason, it seems appropriate to test two other 3D printing technologies, namely :</p> <ul style="list-style-type: none"> - WLAM: Wire Laser Additive Manufacturing (ICB PMDM) - 3D printing: LYNXTER S600D (Pletforme3D) and DESKTOP-METAL (ICB CO2M) <p>These two technologies should enable the microstructure in the capsule wall to be refined, which could avoid the need to remove it (a complex and costly operation). In particular, with these two printers, the capsule itself will be made of sintered powder (of the same nature), which means that there is potentially no distinction between the capsule and the powder.</p>
KEYWORDS:	HIP, capsule, optimisation, particle methods, additive manufacturing
SUPERVISORS	<p>Thesis co-supervisor: Mohamed Hatem ALLOUCHE, mohamed-hatem.allouche@u-bourgogne.fr Senior Lecturer, head of the CALHIPSO hall</p> <p>Thesis supervisor: Rodolphe BOLOT, rodolphe.bolot@u-bourgogne.fr University Professor, head of the LTm team</p>
LABORATORY	<ul style="list-style-type: none"> • ICB laboratory (Halle CALHIPSO - 12 rue de la Fonderie - 71200 Le Creusot), • HIP press: QIH60-D415H1000-1400°C/2000bar, • WLAM machine: Wire Laser Additive Manufacturing (ICB PMDM, Le Creusot), • 2 bonded/powder type 3D printers: LYNXTER S600D (Plateform3D, Le Creusot) and Desktop Metal (ICB CO2M, Belfort), • High-performance computing (CCUB, uB), • Existing thermomechanical FEM models - MANAPI team (DS Simulia licence, uB), • Several one-week stays with our team in Birmingham are planned.
CANDIDATE PROFILE	This thesis is aimed at students with a Master's degree in Mechanics and/or Materials and/or Numerical Modelling, who are motivated, rigorous and methodical, with a definite taste for numerical simulation, multiphysics/multi-scale approaches and teamwork.
REFERENCES	<ol style="list-style-type: none"> 1. BOLOT, R., MATHIEU, A. & SIMON, M. Development of WAAM process: slicer, robot trajectories, and examples of parts. Preprint at https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2625492/v1 (2023). 2. Raut, L. P. & Taiwade, R. V. Wire Arc Additive Manufacturing: A Comprehensive Review and Research Directions. <i>J. Mater. Eng. Perform.</i> 30, 4768–4791 (2021). 3. Sobhani, S., Albert, M., Gandy, D., Tabei, A. & Fan, Z. Design Optimization of Hot Isostatic Pressing Capsules. <i>J. Manuf. Mater. Process.</i> 7, 30 (2023). 4. Chung, S. H., Park, H., Jeon, K. D., Kim, K. T. & Hwang, S. M. An Optimal Container Design for Metal Powder Under Hot Isostatic Pressing. <i>J. Eng. Mater. Technol.</i> 123, 234–239 (2001). 5. Abouaf, M., Chenot, J. L., Raison, G. & Bauduin, P. Finite element simulation of hot isostatic pressing of metal powders. <i>Int. J. Numer. Methods Eng.</i> 25, 191–212 (1988). 6. Van Nguyen <i>et al.</i> A combined model to simulate the powder densification and shape changes during hot isostatic pressing. <i>Comput. Methods Appl. Mech. Eng.</i> 315, 302–315 (2017). 7. Zouaghi, A. Étude de la compaction isostatique à chaud de l'acier inox 316L : Modélisation numérique à l'échelle mésoscopique et caractérisation expérimentale. (ENSM de Paris, 2013). 8. Ariane, M. <i>et al.</i> Discrete multi-physics: A mesh-free model of blood flow in flexible biological valve including solid aggregate formation. <i>PLOS ONE</i> 12, e0174795 (2017). 9. Jerier, J.-F. <i>et al.</i> Study of cold powder compaction by using the discrete element method. <i>Powder Technol.</i> 208, 537–541 (2011).