



école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**

Titre de la thèse : Contribution au développement de méthodes de conception de matériaux intelligents par impression 4D pour une fabrication hautement productive : influence des effets thermiques et thermomécaniques

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

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

Mots-clefs : Fabrication additive 3D-4D, matériaux intelligents, sollicitation thermique, thermo-mécanique, caractérisation, modélisation numérique.

Descriptif détaillé de la thèse :

La Fabrication Additive (FA) est aujourd'hui considérée comme un procédé de fabrication mécanique utilisable au même titre que les procédés de fabrication conventionnels (usinage, moulage par injection, thermoformage, forgeage, etc.). On trouve par exemple des pièces obtenues par FA dans des structures d'avion, de satellites, secteur du bâtiment, etc.

Cette évolution de la FA est due principalement à la liberté de forme autorisée par le procédé lui-même. Le développement de diverses techniques sur le principe de fabrication couche par couche et l'amélioration des matériaux pouvant ainsi être mis en forme, ont été les moteurs de cette évolution.

De nombreuses autres techniques et matériaux dédiés à la FA continuent de voir le jour. Dans le sillage de la FA (communément appelée impression 3D) a émergé un autre mode de fabrication : l'impression 4D qui est le fruit de l'interaction entre "matériaux intelligents", "techniques de fabrication additive" et "principes de transformation" (changement de morphologie, de forme, de couleur, de propriétés mécaniques, de phases, etc.).

Les matériaux intelligents sont des matériaux dont l'état change en fonction d'un stimulus. C'est le cas par exemple des matériaux thermochromiques dont la couleur change en réponse à la chaleur ou des hydrogels qui peuvent se contracter en fonction du pH voire de la température d'un milieu aqueux ou encore de la lumière. Les objets ainsi obtenus ont, en plus d'une forme initiale (3D), la capacité de changer d'état (en fonction des stimuli auxquels sont sensibles les matériaux intelligents qui le composent).

L'introduction de ces nouveaux matériaux dans de nombreux systèmes industriels qu'ils soient mécaniques, thermiques, électriques, ..., apporte une certaine originalité sur la manière d'étudier leur comportement. En effet, il serait possible de maîtriser et d'optimiser de nombreuses pièces maîtresses d'un système en utilisant le bon matériau au bon endroit et en adaptant ses propriétés aux conditions de fonctionnement attendues. Ces matériaux, qualifiés d'intelligents, de réactifs et de sensibles (cas des polymères, des alliages à mémoire de forme (exemples : NiTi, CuNiAl, ...)), sont connus pour leur réaction aux variations de grandeurs physiques telles que la température, l'humidité, la pression ou encore la lumière, et ont la capacité de changer de propriétés, de forme et de comportement au sein d'un système.

L'objectif du travail proposé consistera à poursuivre les recherches initiées, au laboratoire ICB-COMM, sur cette thématique de développement et de mise en forme de matériaux intelligents, en analysant d'une part, leurs comportements aux effets thermiques, thermomécaniques et hygrométriques, et en adaptant d'autre part, leur fonctionnalité au niveau de leurs structures macro et micro. L'étude et l'optimisation du comportement de ces matériaux sous l'action, par exemple, de variations thermiques et /ou hygrométriques définies au préalable, vont permettre d'ajouter une dimension supplémentaire et importante dans le

fonctionnement de certaines pièces maitresses au sein de nombreux systèmes. Les applications sont nombreuses, on peut citer par exemple :

- Le domaine de l'aérospatiale où l'utilisation de matériaux intelligents pourra permettre l'ouverture ou la fermeture des bras de supports de panneaux solaires de satellites en fonction des conditions thermiques imposées.

- Le domaine de l'industrie médicale, où les polymères à mémoire de forme pourraient par exemple être insérés dans l'organisme et réagir aux changements de température ce dernier pour libérer par exemple des antibiotiques selon un schéma prédéfini.

- Le domaine de bâtiment où la combinaison de matériaux de construction traditionnels avec des matériaux intelligents pourrait être une excellente solution pour obtenir des structures capables d'évoluer et de s'adapter assez rapidement à leur environnement.

D'autres domaines tels que la production de l'énergie, l'automobile ou encore l'aéronautique constituent également un champ d'applications intéressant pour ces nouveaux matériaux (FA 4D).

Travaux envisagés :

Les objectifs attendus dans ce travail de thèse sont résumés par les points suivants :

- Etudier et comprendre les phénomènes physiques mis en jeu au sein de ces matériaux lorsqu'ils sont soumis aux variations de grandeurs physiques telles que la température, l'humidité et la pression,

- Concevoir de nouveaux matériaux « intelligents » et réaliser des tests expérimentaux pour analyser leur comportement et/ou leur forme sous l'action de diverses conditions physiques (thermiques, hygrométriques,...),

- Modéliser physiquement les phénomènes observés,

- Caractériser les propriétés physiques (thermiques, mécaniques, ...) nécessaire à la modélisation numérique du procédé.

- Valider les résultats numériques et expérimentaux.

- Optimiser le procédé en se basant sur un exemple de fonctionnement de ces matériaux au sein d'une application pratique.

Références bibliographiques :

[1] J.M. Jafferson, Debdutta Chatterjee. A review on polymeric materials in additive manufacturing. March 2021 Materials Today: Proceedings. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.485

[2] Yuxuan Wang, Yonghui Zhou, Lanying Lin, Jorge Corker, Mizi Fan. Overview of 3D additive manufacturing (AM) and corresponding AM composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 139, December 2020, 106114.

[3] Kirstie R. Ryan, Michael P. Down, Craig E. Banks. Future of additive manufacturing: Overview of 4D and 3D printed smart and advanced materials and their applications. Chemical Engineering Journal, Volume 403, 1 January 2021.

[4] Florent Le Bourhis, Olivier Kerbrat, Jean-Yves Hascoët, Pascal Mognol. Sustainable manufacturing: evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer Verlag, 2013, pp.1-12. ff10.1007/s00170-013-5151-2ff. fhal-00881866.

[5] Florence Pilate, Antoniya Toncheva, Philippe Dubois, Jean-Marie Raquez. Shape-memory polymers for multiple applications in the materials world. European Polymer Journal, Volume 80, July 2016, Pages 268-294

[6] Carmen M. González-Henríquez, Mauricio A. Sarabia-Vallejos, Juan Rodriguez-Hernandez. Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications. Progress in Polymer Science, Volume 94, July 2019, Pages 57-116.

[7] Xiin Li, Jianzhong Shang, Zhuo Wang. Intelligent materials: A review of applications in 4D printing, April 2017, Assembly Automation 37(2):170-185 DOI:10.1108/AA-11-2015-093.

[8] Kundakcioglu, E., Lazoglu, I. & Rawal, S. Transient thermal modeling of laser-based additive manufacturing for 3D freeform structures. *Int J Adv Manuf Technol* 85, 493–501 (2016).

[9] M. Aghahadi, E. Padayodi, S. Abboudi, S.A. Bahrani. Physical modeling of heat and moisture transfer in wet bio-sourced insulating materials. Review of Scientific Instruments 2018, 89 (10), 104902.

[10] G. Sossou, F. Demoly, H. Belkebir, H. J. Qi, S. Gomes, Gh. Montavon, Design for 4D printing: Modeling and computation of smart materials distributions, Materials & Design, Volume 181, 2019, 108074.

[11] Yuze Li, Antonio Olmedilla, Miha Založnik, Julien Zollinger, Lucas Dembinski, et al.. Solidification microstructure during selective laser melting of Ni based superalloy: experiment and mesoscopic modelling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2019, 529, pp.012004.

Profil demandé :

- Avoir des compétences en modélisations physique et numérique des phénomènes de transferts thermiques et des couplages thermomécaniques,
 - Avoir des compétences en matériaux métalliques et en métallurgie,
 - Avoir des connaissances sur la conception par fabrication additive 3D et 4D,
 - Présenter un goût prononcé pour l'expérimentation et l'analyse des phénomènes observés.
- Des notions sur les méthodes de planification d'expérience seront appréciées.

Financement : MESRI établissement

Dossier à envoyer pour le XXX
Début du contrat : octobre 2021

Direction / codirection de la thèse :

M. Saïd ABBOUDI : said.abboudi@utbm.fr, tél : +33 3 84 58 30 36
M. Lucas DEMBINSKI : lucas.dembinski@utbm.fr, tél : +33 3 84 58 32 06



école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**

PhD title: Development of smart material design methods using 4D printing for highly productive manufacturing: thermal and thermomechanical effects

Host laboratory: Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne UMR CNRS 6303, Univ. Bourgogne Franche Comté (UBFC), UTBM - Département COMM, Site de Sévenans, 90010 Belfort Cedex.

Speciality of PhD: Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques, option Mécanique Energétique.

Keywords: 3D-4D additive manufacturing, smart materials, thermal, thermo-mechanics, characterization, numerical modeling.

Job description:

Additive Manufacturing (AM) is now considered as a mechanical manufacturing process that can be used in the same way as conventional manufacturing processes (machining, injection molding, thermoforming, forging, etc.). For example, parts obtained by FA can be found in aircraft structures, satellites, building industry, etc.

This evolution of AM is mainly due to the freedom of shape allowed by the process itself. The development of various techniques based on the principle of layer-by-layer manufacturing and the improvement of the materials that can be shaped have been the driving forces for this evolution.

Many other techniques and materials dedicated to AF continue to be developed. In the wake of AF (commonly known as 3D printing), another manufacturing method has emerged: 4D printing, which is the result of the interaction between "smart materials", "additive manufacturing techniques" and "transformation principles" (change of morphology, shape, color, mechanical properties, phases, etc.).

Smart materials are materials whose state changes according to a stimulus. This is the case, for example, of thermochromic materials whose color changes in response to heat, or hydrogels that can contract according to the pH or temperature of an aqueous medium or light. The objects thus obtained have, in addition to an initial form (3D), the capacity to change state according to the stimuli to which the intelligent materials, which compose it, are sensitive.

The introduction of these new materials in many industrial systems, whether mechanical, thermal, electrical, ..., brings a certain originality on the way to study their behavior. Indeed, it would be possible to control and optimize many major parts of a system by using the appropriate material at the appropriate location and by adapting its properties to the expected operating conditions. These materials, described as intelligent, reactive and sensitive (e.g. polymers, shape memory alloys (e.g. NiTi, CuNiAl, ...)), are known for their reaction to the variations in physical quantities such as temperature, humidity, pressure or light, and have the ability to change properties, shape and behavior within a system.

The objective of the proposed work will be to continue the research initiated in the ICB-COMM laboratory on this topic of development and forming of intelligent materials, by analyzing their behavior to thermal, thermomechanical and hygrometric effects, and by adapting their functionality at the level of their macro and micro structures. The study and optimization of the behavior of these materials under the influence of, for example, thermal and/or hygrometric variations defined previously, will allow to add an additional and important dimension in the functioning of certain main parts within many systems. The applications are numerous, we can note for example:

- The aerospace field, where the use of smart materials could allow the opening or closing of satellite solar panel support bars according to the applied thermal conditions.
- The medical industry, where the shape-memory polymers could, for example, be inserted into the body and react to changes in its temperature to release, for example, antibiotics according to a predefined pattern.
- The building field where the combination of traditional building materials with smart materials could be an excellent solution to obtain structures able to change and adapt quickly enough to their environment.

Other sectors such as energy production, automotive or aeronautics also offer an interesting opportunity for these new materials (4D AM).

Required work:

The expected objectives of this thesis work are summarized by the following points:

- To study and understand the physical phenomena involved in these materials when they are subjected to changes in physical quantities such as temperature, humidity and pressure,
- To design new "intelligent" materials and carry out experimental tests to analyze their behavior and/or their form under the action of various physical conditions (thermal, hygrometric, etc.)
- To model physically the observed phenomena,
- To characterize the physical properties (thermal, mechanical, ...) required for the numerical modeling of the process.
- To validate the numerical and experimental results.
- To optimize the process based on an operating example of these materials within a practical application.

References:

[1] J.M. Jafferson, Debdutta Chatterjee. A review on polymeric materials in additive manufacturing. March 2021 Materials Today: Proceedings. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.485

[2] Yuxuan Wang, Yonghui Zhou, Lanying Lin, Jorge Corker, Mizi Fan. Overview of 3D additive manufacturing (AM) and corresponding AM composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 139, December 2020, 106114.

[3] Kirstie R. Ryan, Michael P. Down, Craig E. Banks. Future of additive manufacturing: Overview of 4D and 3D printed smart and advanced materials and their applications. Chemical Engineering Journal, Volume 403, 1 January 2021.

[4] Florent Le Bourhis, Olivier Kerbrat, Jean-Yves Hascoët, Pascal Mognol. Sustainable manufacturing: evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer Verlag, 2013, pp.1-12. ff10.1007/s00170-013-5151-2ff. fhal-00881866.

[5] Florence Pilate, Antoniya Toncheva, Philippe Dubois, Jean-Marie Raquez. Shape-memory polymers for multiple applications in the materials world. European Polymer Journal, Volume 80, July 2016, Pages 268-294

[6] Carmen M. González-Henríquez, Mauricio A. Sarabia-Vallejos, Juan Rodríguez-Hernandez. Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications. Progress in Polymer Science, Volume 94, July 2019, Pages 57-116.

[7] Xiin Li, Jianzhong Shang, Zhuo Wang. Intelligent materials: A review of applications in 4D printing, April 2017, Assembly Automation 37(2):170-185 DOI:10.1108/AA-11-2015-093.

[8] Kundakcioglu, E., Lazoglu, I. & Rawal, S. Transient thermal modeling of laser-based additive manufacturing for 3D freeform structures. *Int J Adv Manuf Technol* 85, 493–501 (2016).

[9] M. Aghahadi, E. Padayodi, S. Abboudi, S.A. Bahrani. Physical modeling of heat and moisture transfer in wet bio-sourced insulating materials. Review of Scientific Instruments 2018, 89 (10), 104902.

[10] G. Sossou, F. Demoly, H. Belkebir, H. J. Qi, S. Gomes, Gh. Montavon, Design for 4D printing: Modeling and computation of smart materials distributions, Materials & Design, Volume 181, 2019, 108074.

[11] Yuze Li, Antonio Olmedilla, Miha Založnik, Julien Zollinger, Lucas Dembinski, et al.. Solidification microstructure during selective laser melting of Ni based superalloy: experiment and mesoscopic modelling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2019, 529, pp.012004.

Candidate Profile:

The candidate must:

- Have competence in physical and numerical modelling of heat transfer phenomena and thermomechanical couplings,
- Have skills in metallic materials and metallurgy,
- Have some knowledge on 3D and 4D additive manufacturing design,
- Have a pronounced interest in experimentation and analysis of observed phenomena.

Some knowledge of experimental designs would be appreciated.

Financing Institution:

Application deadline:

Start of contract: october 2021

Supervisor(s) :

M. Saïd ABBOUDI: said.abboudi@utbm.fr, phone : +33 3 84 58 30 36

M. Lucas DEMBINSKI: lucas.dembinski@utbm.fr, phone : +33 3 84 58 32 06