

Robotique pour la fabrication additive de pièces en silicone Laboratoire ICube, équipe RDH

Mots clés : robotique, impression 3D, expérimentation, conception

1. Problématique générale et contexte de la thèse

Le silicone est un matériau approprié dans un grand nombre d'applications industrielles. Il est particulièrement intéressant dans le domaine médical car il est souple, proche des propriétés mécanique des tissus et biocompatible. Ainsi, il est considéré pour la réalisation de cathéters, d'implants ou de prothèses. Ces dernières sont aujourd'hui conçues comme des composants passifs, et aussi actifs, avec par exemple à l'ETH Zurich, l'élaboration d'un cœur artificiel en silicone [1] (Figure 1).



Figure 1 : Cœur artificiel en silicone développé par Cohrs ETHZ

La problématique de fabrication de prothèse active en silicone rejoint alors celle de la production de robots souples, où le recours au silicone est aussi très fréquent. Les solutions usuelles de fabrication restent, pour des pièces en silicone, le moulage et l'injection. Ces approches sont peu adaptées à une production patient-spécifique qui est généralement nécessaire dans un cadre médical et restrictives quant aux formes pouvant être conçues. La fabrication additive ou impression 3D ouvre à ce niveau de nouvelles perspectives. Avec la fabrication additive indirecte, un moule est imprimé dans lequel sera injecté le silicone. La production de pièces géométriquement complexes reste cependant délicate, comme avec un moulage ou une injection conventionnelle. Fabriquer de manière directe, en formant la pièce par dépose de silicone, offre en revanche une plus grande liberté de forme (comme présenté Figure 2). C'est l'approche considérée dans ce travail.

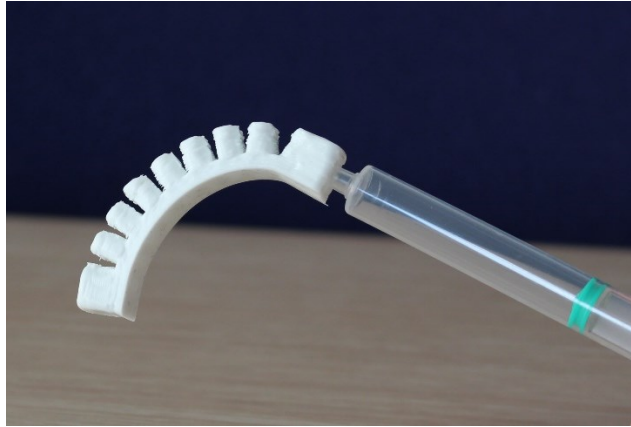


Figure 2 : Actionneur pneumatique de type PneuNet imprimé en silicone au laboratoire ICube

Aujourd'hui, la fabrication additive silicone directe (SLS, LDM, ...) requiert l'emploi de silicones dont la formulation chimique est spécifiquement adaptée à l'impression 3D. La dépose par extrusion de silicones industriels standards présente en effet des difficultés, notamment du fait du comportement du silicone pendant sa mise en forme. Nous visons à lever les contraintes les plus critiques à travers le projet collaboratif RAMSAI, pour "Robotized Additive Manufacturing for Silicone assisted by Artificial Intelligence" financé par l'agence Nationale de la Recherche (ANR). Dans ce projet nous cherchons à améliorer la fabrication additive silicone par dépôt en phase liquide (LDM). Nous proposons une approche à deux niveaux : au niveau de la maîtrise de l'écoulement du silicone à travers la buse d'impression et au niveau de la couche par une optimisation des stratégies de dépose, en ayant recours à une dépose à l'aide d'un robot, selon des trajets non planaires. Pour faire ce travail, un consortium a été créé, constitué du laboratoire ICube de Strasbourg, spécialisé en robotique et mécatronique, du laboratoire IMP (Ingénierie des Matériaux Polymères) de Lyon, spécialisé dans la rhéologie et le comportement du silicone, du laboratoire ICBMS (Institut de Chimie et de Biochimie Moléculaires et Supramoléculaires) de Lyon, notamment avec sa plateforme 3d.Fab, spécialisé dans l'impression 3D silicone, et enfin, le laboratoire PIMM (Procédés et Ingénierie en Mécanique et Matériaux), de l'ENSAM de Paris, spécialisé en Intelligence Artificielle et modélisation du comportement des élastomères.

2. Problématiques abordées dans la thèse

Les problématiques liées à l'impression 3D robotisée silicone seront traitées dans cette thèse à 3 niveaux.

Imprimabilité de pièce : Le caractère pâteux du silicone peut rendre problématique la production de pièces, notamment en présence d'éléments en surplombs, pouvant s'effondrer sous leur propre poids avant réticulation. Les travaux de Courtial et al. [2] sont particulièrement pertinents pour estimer à partir d'une CAO l'imprimabilité de pièces en silicone. Cependant ils reposent aujourd'hui seulement sur quelques règles pour statuer de l'imprimabilité d'une pièce. Nous proposons d'intégrer une base de connaissances dans la méthode de conception pour établir si la structure est imprimable tout en tenant compte d'un

modèle de comportement du silicone et d'une stratégie de dépose non planaire avec une orientation de buse variable.

Observation et supervision : l'impression 3D se déroule généralement en boucle ouverte, c'est-à-dire qu'une fois l'impression lancée il n'y a pas de retour d'informations permettant de savoir si l'impression se déroule correctement. S'il existe des travaux sur la supervision de l'impression 3D en cours d'impression, notamment pour des thermoplastiques ou des ciments dans le BTP, rien n'a été fait pour l'impression 3D silicone. Nous proposons de mettre en place un système permettant de faire la supervision de l'impression 3D de silicone. Les informations extraites de ces observations permettront d'alimenter une intelligence artificielle qui permettra d'évaluer la qualité de l'impression en cours. Pour aller plus loin dans la démarche, nous souhaitons mettre en place une boucle de correction, en agissant soit sur la trajectoire de la buse d'impression soit sur le comportement du silicone (actions sur la cinétique de réticulation du silicone)

Stratégie de dépose : Le temps de durcissement et le caractère viscoélastique du silicone sont des paramètres complexes à maîtriser au cours de l'impression. En effet, si on souhaite fabriquer une pièce relativement haute et élancée, la superposition de couches et des problèmes d'adhérence du silicone avec la buse et la couche courante peuvent engendrer des erreurs géométriques voire un échec de l'impression avec un effondrement. Nous avons pu mettre en place un environnement expérimental d'impression 3D silicone dans un environnement contraint (cf. Figure 3). Les premiers essais d'impressions nous montrent que l'angulation de la buse par rapport à la couche précédente influence très fortement la géométrie du cordon de silicone. Dans le cadre de ce travail de thèse, nous souhaitons aller plus loin en optimisant les stratégies de dépose pour, par exemple, aller vers une impression de formes en forte contre-dépouilles sans structure support.

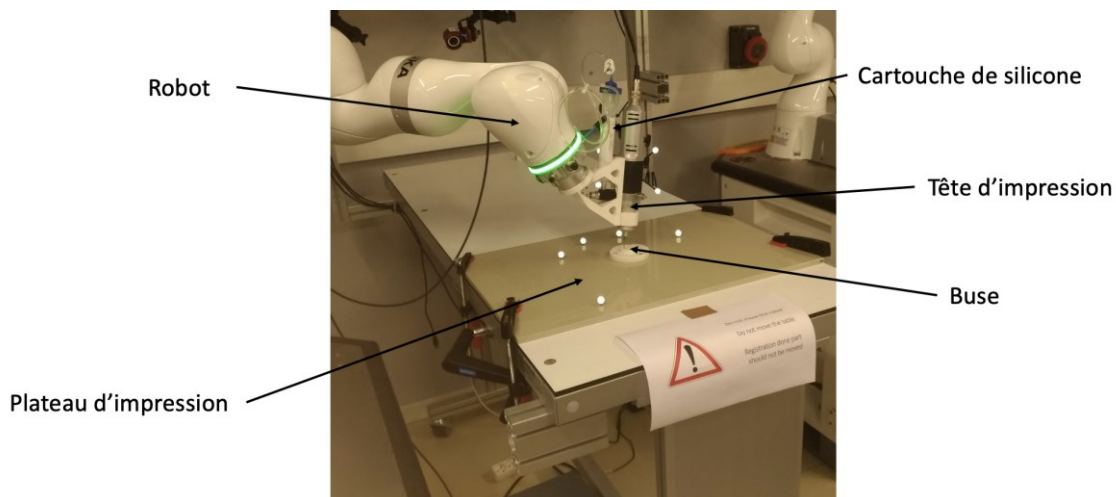


Figure 3 : cellule robotique pour l'impression silicone mise en place au laboratoire ICube

3. Objectifs et démarche

Le travail de thèse se déroulera selon les axes principaux décrits comme ci-dessous :

1. Stratégies de déposes optimales pour le silicone
 - a. Déterminer et proposer une procédure de tranchage compatible avec l'impression 3D robotisée de pièce en silicone
 - b. Mettre en place une génération de trajectoire optimale pour une dépose robotisée avec un robot à 6 degrés de liberté.
 - c. Montrer l'intérêt de l'approche sur des pièces caractéristiques présentant des surplombs et des angles de contre-dépouilles importants
2. Observation et supervision de l'impression 3D
 - a. Proposer un banc expérimental pour observer et quantifier les paramètres qui influencent la qualité d'impression ;
 - b. Proposer une stratégie de supervision basée sur l'intelligence artificielle pour déterminer si la pièce en cours d'impression aboutira aux spécifications du cahier des charges. Cette étape se fera conjointement avec le laboratoire PIMM et sera validée expérimentalement ;
 - c. Proposer une stratégie permettant de corriger en ligne la trajectoire et l'orientation de la buse pour éviter des effondrements ou des aberrations dans la structure d'une pièce.
3. Contrôle prédictif de la dépose de silicone basée modèle
 - a. Proposer une boucle de commande qui permettra d'anticiper et ainsi augmenter les capacités d'impression, à partir des données expérimentales de rhéologie du silicone fournies par IMP et un modèle de comportement basé IA, fourni par PIMM.
 - b. Évaluer l'apport d'une buse à géométrie variable, en cours de développement, et mettre en avant la plus value de cette fonctionnalité dans une boucle fermée d'impression 3D.

4. Profil recherché

Le travail relève de la **robotique et de la mécatronique**. Il sera exploratoire avec l'investigation de plusieurs stratégies pour améliorer le procédé de fabrication robotisée de pièces en silicone destinées à ces applications médicales. Il sera expérimental compte tenu de l'exploitation d'un dispositif prototype robotique. Le candidat sélectionné devra avoir un goût marqué pour ces aspects. Le candidat aura idéalement la maîtrise d'outils de CAO, des bases solides en programmation (langage haut niveau C++ et programmation temps réel). Des connaissances en ROS2 seraient un atout et des connaissances en matériau et intelligence artificielle faciliteraient le dialogue avec les partenaires du projet RAMSAI.

Le projet amènera le candidat à interagir avec ICBMS et IMP sur les questions de comportement rhéologique du silicone au cours de l'extrusion, ainsi que PIMM sur l'implication de l'intelligence artificielle dans les stratégies de dépose. L'implication dans le projet RAMSAI impose d'avoir le sens du contact et la curiosité scientifique nécessaires à un travail également pluridisciplinaire.

5. Conditions de réalisation de la thèse

Le travail aura lieu dans les locaux de l'équipe RDH et de la plateforme IRIS au sein de l'IHU Strasbourg, avec potentiellement des déplacements ponctuels chez les partenaires du projet.

Il pourra profiter des plateaux [expérimentaux](#) de la [plateforme IRIS](#) (cellules robotiques KUKA Ilwa, fabrication additive multi-matériaux Stratasys, ...) avec le soutien des ingénieurs de recherche experts du domaine de la robotique, la métrologie et la commande.

Le travail se fera en interaction avec l'ensemble des partenaires du projet RAMSAI, mais plus particulièrement avec l'équipe du laboratoire ICube de Strasbourg :

- Laurent Barbé, ingénieur de recherche et co-responsable de la plateforme IRIS, expert en commande robotique ;
- François Geiskopf, maître de conférence et expert en fabrication ;
- Benoit Wach, ingénieur de recherche en conception mécatronique et fabrication additive ;
- Maciej Bednarczyk, ingénieur de recherche en développement logiciel pour la commande robotique ROS2 ;
- Pierre Renaud, professeur et expert en conception mécatronique.

La thèse débutera dès l'automne 2023, avec un financement assuré sur le projet RAMSAI.

6. Contact et modalités de candidature

Pierre Renaud, Professeur des Universités à l'INSA de Strasbourg

Pierre.renaud@insa-strasbourg.fr

Laurent Barbé, Ingénieur de Recherche à l'Université de Strasbourg

laurent.barbe@unistra.fr : 03 90 41 35 43

Candidature : la candidature doit se faire par envoi de CV, lettre de motivation et relevés de notes des deux derniers semestres par e-mail.

[1] N. H. Cohrs *et al.*, « A Soft Total Artificial Heart—First Concept Evaluation on a Hybrid Mock Circulation », *Artif. Organs*, vol. 41, n° 10, p. 948-958, 2017, doi: 10.1111/aor.12956.

[2] A. Lopez, C. A. Marquette, et E.-J. Courtial, « FingerMap: a new approach to predict soft material 3D objects printability », *Prog. Addit. Manuf.*, juill. 2020, doi: 10.1007/s40964-020-00143-5.