



**HAL**  
open science

## Introduction de la réalité augmentée pour une mise en œuvre plus flexible de la fabrication additive

Sébastien Ibarboure, Sébastien Bottecchia, Emmanuel Duc, Nadine Couture

### ► To cite this version:

Sébastien Ibarboure, Sébastien Bottecchia, Emmanuel Duc, Nadine Couture. Introduction de la réalité augmentée pour une mise en œuvre plus flexible de la fabrication additive. Journées de la Réalité Virtuelle (JRV 2018), Oct 2018, Evry, France. hal-01940245

**HAL Id: hal-01940245**

**<https://hal.science/hal-01940245v1>**

Submitted on 30 Nov 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Introduction de la réalité augmentée pour une mise en œuvre plus flexible de la fabrication additive.

Sébastien Ibarboure\*  
Univ. Bordeaux, ESTIA,  
LaBRI, UMR 5800

Sébastien Bottecchia†  
Univ. Bordeaux, ESTIA

Emmanuel Duc‡  
Université Clermont Auvergne,  
CNRS, Institut Pascal

Nadine Couture§  
Univ. Bordeaux, ESTIA,  
LaBRI, UMR 5800

## ABSTRACT

L'Usine 4.0 préconise la production de produits personnalisés par le biais d'un nouveau procédé de fabrication : la fabrication additive. Sa mise en œuvre par la chaîne numérique, telle que définie aujourd'hui, favorise l'automatisation de la fabrication. Cependant les procédés de fabrication sont sources de nombreuses erreurs imprévisibles et inhérentes à la méthode de fabrication. L'intervention d'un opérateur directement au sein de la cellule robotisée pour adapter la fabrication est aujourd'hui impossible. Nous proposons donc de faire évoluer cette chaîne numérique pour permettre une fabrication plus flexible en donnant la possibilité à l'opérateur d'interagir avec le procédé de fabrication. L'opérateur prendra le contrôle manuel du procédé grâce à l'enrichissement de la scène de fabrication avec les données de fabrication au moyen de technologies de réalité augmentée. Plusieurs tâches qui semblent pertinentes ont pu être identifiées notamment la prise de contrôle de l'outil et du bridage de cet outil par rapport à la scène de fabrication grâce à différentes méthodes d'interaction au travers d'un environnement numérique visible par exemple au travers de lunettes de réalité augmentée.

**Index Terms:** Human-centered computing—Interaction paradigms—Mixed / augmented reality;

## 1 INTRODUCTION

L'industrie mécanique évolue actuellement selon une approche Usine 4.0 où l'usine se veut être un système cybernétique à l'interface entre le produit, les concepteurs et le client. Ce nouveau modèle introduit une nouvelle vision de la production manufacturière. En particulier, elle s'oriente vers la production de masse d'un produit unitaire personnalisable au détriment de la production d'un produit standardisé en série, comme il est décrit dans le *Livre blanc de la recherche en mécanique* [10].

Pour cela, la fabrication additive est un procédé alternatif pertinent. Il s'agit d'un ensemble de nouveaux procédés générés par des machines à commande numérique ou des robots dont la particularité est la construction d'un objet 3D en couches successives par un apport de matière et d'énergie localisées, comme peut le définir l'ASTM (American Society of Testing Materials) citée par [3]. Ces procédés se distinguent des procédés par retrait de matière ou formage en permettant la fabrication sans assemblage mécanique d'un objet aux formes complexes pouvant être constitué de plusieurs matériaux.

Aujourd'hui, la fabrication additive est mise en œuvre par une chaîne numérique [1, 5], un processus monolithique qui favorise l'automatisation complète de la fabrication et pour lequel il est

nécessaire de définir de façon précise et définitive les caractéristiques du produit dès la conception. Toute erreur ou modification de la géométrie entraîne la réexécution complète de toute la chaîne numérique et avec la mise au rebut de ce qui a déjà été fabriqué. Or, la fabrication additive est un procédé où le dépôt répété de matière est source de nombreuses erreurs de fabrication.

C'est pourquoi nous proposons de faire évoluer la chaîne numérique pour rendre la fabrication plus flexible afin de permettre à un opérateur d'en interrompre le déroulement pour répondre à l'apparition d'un aléa. Cette interruption de la fabrication doit permettre d'interagir avec l'objet en cours de fabrication et les moyens de production afin d'opérer les modifications permettant la relance de la fabrication. Nous souhaitons pour cela étudier l'intérêt de déployer un dispositif de réalité augmentée permettant de supporter cette interaction directement au sein de la cellule de fabrication.

Dans la suite de cet article, nous présenterons le déroulement de la mise en œuvre des procédés de fabrication additive par la chaîne numérique et leurs limitations (Sections 2.1 et 2.2). Puis nous présenterons un état de l'art des apports de la communauté en Interaction Homme-Machine résolvant certaines de ces limitations et par lequel nous entreverrons les possibilités qu'offre la réalité augmentée (Section 3). Nous poursuivrons par la formulation de la boucle d'interaction avec le procédé de fabrication permettant l'adaptation de la fabrication au cours de sa mise en œuvre (Section 4.1) Nous verrons ensuite que cette interaction se traduit par deux situations d'usage aux-quelles l'opérateur sera confronté pour rendre possible cette adaptation (Section 4.2) permettant ensuite d'envisager l'utilisation de la réalité augmentée comme support de l'interaction entre l'opérateur et le procédé de fabrication (Section 4.3). Nous finirons par une conclusion sur les apports de cet article pour la mise en œuvre de la fabrication additive et sur les poursuites envisagées.

## 2 LA FABRICATION ADDITIVE

### 2.1 La chaîne numérique aujourd'hui, synthétisée à partir de [1, 5, 9]

La chaîne numérique (schématisée Figure 1) est un processus entièrement informatisé depuis les années 2000 et dont l'existence remonte à une cinquantaine d'années. Elle décrit la mise en œuvre des procédés industriels de fabrication qui font appel à des robots ou des machines à commande numérique. Ce processus est un enchaînement de transformations géométriques pour passer de la conception à la fabrication permettant ainsi de traduire le besoin fonctionnel en un objet réel.

Dans le cadre de la fabrication additive, la chaîne numérique débute par l'étape de Conception Assistée par Ordinateur (CAO, Figure 1, Etape bleue) durant laquelle est réalisée la conception 3D (Figure 2, (1)) de l'entité géométrique que l'on souhaite réaliser. Cette conception est réalisée à partir des spécifications contenues dans le cahier des charges préalablement défini. Pour cette conception diverses simulations numériques sont réalisées afin de valider le dimensionnement de l'entité géométrique. Le livrable ainsi obtenu est une modélisation 3D du produit dont la géométrie a été pensée pour être fabricable par le procédé de fabrication choisi.

\*e-mail: s.ibarboure@estia.fr

†e-mail: s.bottecchia@estia.fr

‡e-mail: emmanuel.duc@sigma-clermont.fr

§e-mail: n.couture@estia.fr

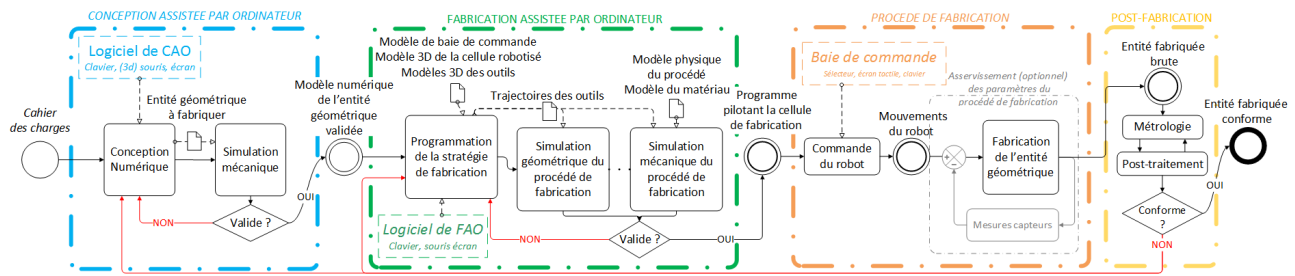


Figure 1: Le processus et le vocabulaire de la chaîne numérique, produit à partir de [1, 5].

De ce modèle est extrait un modèle approché STL (Standard Triangle Language), support de l'étape de Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO, Figure 1, Etape verte). Cette étape permet d'établir la stratégie outil (Figure 2, (2)) à mettre en œuvre pour obtenir l'entité modélisée. Cette stratégie outil prend la forme d'un programme machine, écrit dans un langage formalisé tel que les langages CNC ISO ou le G-Code. Ce programme contient essentiellement les points de passage de l'outil, le mode d'interpolation entre ces points, le schéma de vitesse de l'outil et différents appels à des fonctions technologiques. L'obtention d'un tel programme fait appel à la création d'un modèle en tranche de l'objet 3D (Figure 3) et de ces supports de fabrication. Pour chaque tranche est définie une trajectoire de l'outil permettant sa fabrication, à partir des paramètres de fabrication (épaisseur de peau, hauteur de couche, méthode de remplissage ...) choisis en fonction du procédé et appliqué à la pièce quelque soit les spécificités géométriques.

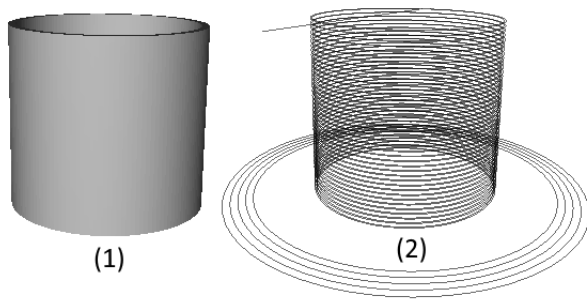


Figure 2: (1) Modèle STL et (2) visualisation du programme outil obtenue avec le slicer Simplify3 pour impression 3D plastique.

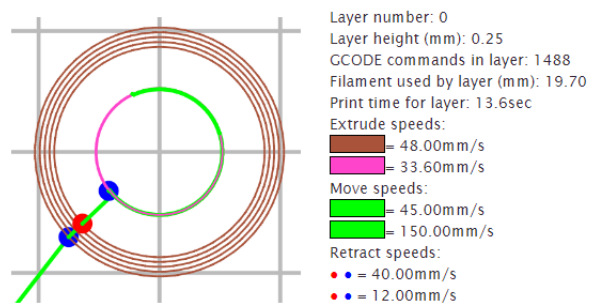


Figure 3: Modélisation en tranche (ici la couche 0) avec le détail des principaux paramètres pour impression 3D plastique, générée à partir de Simplify3D.

Avant réalisation de la fabrication, ce programme est vérifié par la simulation de la scène robotisée de fabrication afin d'en valider la cohérence avec le procédé de fabrication. Le processus se poursuit alors par la fabrication de l'entité géométrique (Figure 1, Etape orange) via le poste de pilotage de l'unité de production qui interprète ce programme machine en un enchaînement de mouvements générant la mise en couche par le procédé de fabrication.

Le processus de fabrication se termine par une phase de métrologie (Figure 1, Etape jaune) permettant d'évaluer le respect du besoin fonctionnel. Les spécifications géométriques et les propriétés mécaniques sont contrôlées.

## 2.2 Les limites de la chaîne numérique

Aujourd'hui, l'utilisation seule du procédé de fabrication additive ne permet pas d'obtenir des produits finis dits de service. En effet, il est nécessaire de mettre en place plusieurs étapes de post-traitements mécaniques ou chimiques (Figure 1, Etape jaune) pour éliminer les supports de fabrication, d'une autre part, pour donner à l'objet les propriétés mécaniques et esthétiques attendues [4]. Cependant ces étapes de post-traitements se limitent principalement au traitement des surfaces extérieures et ne permettent pas la correction de défauts présents au coeur de l'objet.

Concevoir pour la fabrication additive est toujours un défi technique. En effet, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance des relations qui existent entre plus d'une centaines de paramètres de conception et leur effets sur le procédé de fabrication, afin de trouver le bon compromis qui permet d'obtenir la qualité géométrique et physique désirée pour l'objet fabriqué. Il est donc bien souvent nécessaire de réaliser plusieurs essais pour obtenir un résultat satisfaisant. Cependant les procédés de fabrication additive sont des procédés de fabrication lents : la fabrication d'une pièce peut s'étendre de quelques heures pour l'impression 3D plastique, à plusieurs jours pour l'impression d'un grand volume de métal ou de béton. Ce qui a pour effet de limiter le nombre d'itérations mise en place durant le processus de conception et de validation de la stratégie de fabrication. Il est donc intéressant de pouvoir capitaliser sur ce qui est déjà fabriqué sans réexécuter entièrement la fabrication.

En effet tout le long du processus, la pièce à fabriquer est conçue et produite en considérant l'objet dans son intégralité et cela ne permet pas d'apporter des modifications sans la réexécution complète de l'ensemble des étapes du processus. L'adaptation in-situ au cours de fabrication est donc de fait impossible, la chaîne numérique n'étant pas assez flexible dans son exécution pour permettre une intervention pendant la mise en œuvre du procédé. Pour permettre cette adaptation, il est nécessaire de doter l'opérateur de moyens d'intervenir dans la mise en œuvre en temps réel.

## 3 ETAT DE L'ART : INTERACTION HOMME-MACHINE ET FABRICATION ADDITIVE

Depuis quelques années, le prototypage rapide utilisant l'impression 3D s'est démocratisé suite à l'expiration du brevet déposé sur la tech-

nologie. L'impression 3D plastique est aujourd'hui une technologie à bas-coûts qui ne cesse de gagner en performances et séduit de plus en plus le grand public. Cependant son utilisation même dans le secteur industriel pour la fabrication de produits finis reste un sujet complexe. Pour améliorer l'utilisation de ce procédé les chercheurs en Interaction Homme-Machine proposent différents concepts.

*Patching Physical Object* [11] propose une solution logicielle pour modifier un objet en impression 3D plastique. Cette solution logicielle implique l'utilisation d'une machine de fabrication hybride : buse pour le dépôt de matière plastique, une fraise pour l'usinage et un scanner 3D. Ce dispositif a pour objectif de traiter les erreurs de fabrication et de réparer les parties endommagées d'un objet lors de son utilisation. Le second objectif poursuivi par ce dispositif est de redonner une utilité à des objets imprimés en permettant leur mise à jour. Cette capacité de mettre à jour la géométrie d'un objet permet d'envisager un gain de temps et de matière (réduction des déchets) et plus particulièrement dans le cadre du design itératif. Cette solution logicielle permet alors d'envisager une rupture dans la chaîne numérique en permettant l'édition d'un objet fabriqué. Pour cela l'opérateur place l'objet qu'il veut modifier dans l'imprimante 3D et sélectionne le modèle 3D qui correspond à la nouvelle apparence de l'objet. Un scan 3D permet d'évaluer les différences entre l'objet réel et le modèle 3D. La solution logicielle permet alors de calculer les opérations de fabrication nécessaires à l'obtention de l'objet désiré en réduisant au maximum le coût en matière.

Le dispositif proposé par *Patching Physical Object* [11] n'offre cependant pas d'évolution des moyens d'interaction. L'utilisateur pilote le dispositif d'impression 3D depuis une interface graphique de type WIMP et utilisant les périphériques usuels de la bureautique.

Sur les modalités et métaphores d'interaction avec les machines utilisées pour la fabrication additive, *Interactive Fabrication* [13] propose de réduire la distance entre la conception et le produit fini. Pour cela, ils ont équipé plusieurs machines de dispositifs tangibles dont une imprimante 3D et ils laissent l'utilisateur donner libre cours à son imagination pour créer une forme par le biais de ces équipements. Il n'y a plus d'intermédiaire entre la matière brute et l'objet final. L'utilisateur peut alors se servir de l'imprimante 3D comme d'un outil traditionnel pour donner la forme qu'il souhaite à la matière brute en entrée comme le ferait un sculpteur avec un bloc de marbre pour obtenir une statue. L'utilisateur n'a alors besoin d'aucune connaissance en conception numérique pour réaliser son objet. L'interface apporte une grande souplesse d'utilisation mais cela requière de s'approprier les moyens de fabrication par l'expérimentation. Cependant les résultats de leurs expérimentations pour une utilisation purement manuelle montrent qu'il existe un décalage de qualité entre l'objet attendu et le résultat obtenu.

ReFORM [12] s'attaque aussi au problème de l'interaction dans le processus de conception et propose un nouveau cadre de prototypage en partant du constat que la fabrication avec les machines d'impression 3D est unidirectionnelle, c'est-à-dire que la fabrication d'un objet se fait toujours de la conception numérique vers la fabrication. Le designer est contraint par la chaîne numérique et il est donc bridé dans son processus de créativité. ReFORM introduit le concept d'espace de fabrication bilatérale qui utilise une machine de fabrication hybride exploitant la malléabilité de l'argile et un scanner 3D. Le designer peut soit concevoir de manière numérique en utilisant des outils de CAO traditionnels, soit utiliser directement ses mains pour sculpter les formes qu'il souhaite. Dans ce dernier cas de figure, le designer dès qu'il le souhaite peut faire un scan de l'objet. Le scanner 3D est alors utilisé pour mettre à jour le modèle numérique associé à l'objet mettant en oeuvre la bilatéralité de la fabrication. Cette mise à jour permet la création de différentes versions numériques de l'objet. Par ce système d'historisation de la fabrication, les auteurs vont jusqu'à implémenter un mécanisme que l'on peut assimiler à un « Ctrl-Z » en informatique et qui permet le retour à une version antérieure de l'objet. Un autre point

marquant dans ReFORM est l'exploitation de la vitre de protection de l'imprimante 3D comme support d'augmentation. L'idée de se servir de la vitre de protection des machines-outils comme d'une interface numérique avait déjà été proposée par [6] dans un contexte d'usinage afin de montrer à l'opérateur les paramètres machines et les efforts de coupe de l'outil en temps réel. ReFORM pousse le concept plus loin en offrant de l'interaction par le biais d'une roue de défilement muni d'un clic de validation. La vitre de la machine sert de support pour l'ensemble des menus 2D permettant le pilotage de l'imprimante 3D. Elle offre aussi un aperçu 3D à l'utilisateur avant impression de ce qui va être fabriqué permettant de ramener la scène de fabrication numérique au sein de l'imprimante 3D. Cependant l'interaction au travers de cette vitre avec le bloc d'argile se limite à quelques opérations de fabrication comme la mise en oeuvre de la fonction de retour en arrière ou bien l'enlèvement de toute une épaisseur d'argile située au-dessus d'un plan virtuel sécant avec l'objet permettant à l'utilisateur de repartir sur une surface plane.

RoMA [7] propose une solution qui rapproche l'étape de conception et de l'étape de fabrication. Pour cela RoMA transforme une cellule de fabrication constituée d'un robot industriel 6 axes muni d'une tête d'impression plastique en un environnement de conception numérique. Cet environnement est centré autour de la table de fabrication située au centre de la cellule. Le designer conçoit directement sur la table depuis cet environnement virtuel et interactif accessible grâce à un casque de réalité augmentée pour permettre un prototypage in-situ. Il interagit dans cet environnement par le biais d'un « Motion Controller » et de menus 2D virtuels qui mettent à sa disposition des outils de construction géométrique. A tout moment le designer peut donner l'ordre au robot de commencer à fabriquer les éléments géométriques précédemment dessinés par l'opérateur. Pour permettre la synchronisation entre la fabrication et la conception l'équipe de RoMA a recours à un procédé de fabrication basse résolution proposée par *On-the-Fly-Print* [8] qui permet de réduire grandement le temps de fabrication en simplifiant la géométrie par une représentation surfacique facettisée de la géométrie. Par cette technique, le robot ne construit que le maillage représentant la surface. Cette synchronisation permet au designer de continuer de concevoir la géométrie tout en suivant la construction de l'objet. Habituellement une cellule robotisée de ce type est un lieu inaccessible durant la mise en service du robot. Mais dans RoMA, la cellule de fabrication est vue comme un espace de coopération entre le robot et le designer. Pour des raisons de sécurité et pour limiter l'interaction physique avec le robot qui n'est pas un cobot, le volume de travail est partagé et l'espace qui est confié au robot évolue dynamiquement en fonction de la proximité du designer avec la zone de fabrication. Mais l'opérateur peut à tout moment interrompre le robot durant la fabrication en touchant la surface de la table pour accéder à une surface située dans l'espace réservé au robot. Cet environnement de conception qui plonge l'utilisateur dans un espace numérique 3D donne la possibilité de se déplacer autour de l'objet que l'on conçoit. Cet environnement facilite ainsi la perception des volumes et permet à l'utilisateur de résoudre plus rapidement les problèmes de conception qu'il peut rencontrer. D'autant plus que l'immersion est renforcée par une conception à taille réelle de ce qui est fabriqué. Cet espace en réalité augmentée permet ainsi de faire la connexion entre l'espace réel et l'espace virtuel.

Ces travaux proposent des concepts qui impactent le fonctionnement de la chaîne numérique. L'ensemble de ces concepts ont en commun d'aider l'utilisateur à mieux fabriquer ce qu'il imagine, en lui donnant accès à de nouveaux outils pour concevoir plus librement et à proximité du procédé de fabrication. Cependant on peut noter que leurs démarches restent plus axées sur le prototypage rapide et non sur la fabrication de produits finis qui comme nous l'avons montré dans la partie précédente est économiquement cruciale.

## 4 DE L'INTERACTION POUR PLUS DE FLEXIBILITÉ

Nous proposons d'aller plus loin en nous positionnant dans le cas de l'industrialisation d'un produit de service personnalisable, utilisant un procédé de fabrication additif hybride. Nous avons identifié au sein de la chaîne numérique qu'il est souhaitable d'intervenir durant la phase de conduite du procédé de fabrication.

### 4.1 Une nouvelle chaîne numérique

Nous proposons une nouvelle approche de la chaîne numérique basée sur la prise en compte d'une interaction humaine pour permettre une fabrication plus flexible. L'idée qui peut être formulée est la suivante : adapter la fabrication en cours d'exécution (Figure 1, Etape Orange) par l'interaction de l'opérateur avec le procédé de fabrication sans devoir tout reconstruire depuis zéro. Cette adaptation est faite en suivant un enchaînement de 3 étapes identifiées. Elle est déclenchée par l'apparition d'un évènement qui perturbe la stratégie initiale de fabrication. La première étape (Figure 4, Tâche 1) est une étape de capture de l'état intermédiaire de la pièce permettant de comparer le modèle numérique (CAO ou FAO) avec l'objet réel en cours de fabrication. Elle est suivie d'une étape de prise de décision et d'exécution des modifications commandée « manuellement » (Figure 4, Tâche 2). Soit on a besoin de rectifier la géométrie par une opération d'usinage, soit on a besoin de compléter la géométrie par ajout de matière ou d'un élément structurel. Le processus se termine alors par une étape (Figure 4, Tâche 3) permettant de reconnecter le processus avec la stratégie initiale.

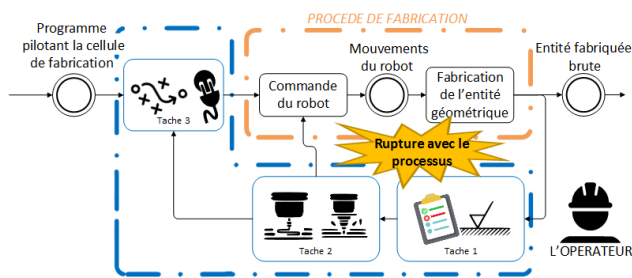


Figure 4: Rupture du processus pour l'adaptation d'une entité géométrique pendant la fabrication.

Rectifier ou compléter nécessite la mise en œuvre du système robotisé et le pilotage de l'outil associé à ces deux opérations mécaniques. Le pilotage de l'outil est fait par une interface entre l'opérateur et la baie de commande qui envoie les ordres de mouvement au robot. Pour commander le robot, l'opérateur doit maîtriser les déplacements de l'outil dans l'environnement et corriger ces actions en fonction de ce qu'il peut percevoir des conséquences de l'interaction entre le procédé et la pièce. Ainsi, l'interface doit faire remonter les informations mécaniques et géométriques à l'utilisateur et faciliter la comparaison entre le réel et le virtuel.

### 4.2 Deux situations d'usage

Deux situations d'usage sont alors envisagées dans le cadre de ce travail :

- Situation 1 : Prendre le contrôle manuel de l'outil robotisé et s'appuyer sur la géométrie numérique pour réaliser l'adaptation de la pièce, ce qui implique l'utilisation de la géométrie numérique pour enrichir l'appréciation du contexte réel.
- Situation 2 : Pouvoir modifier le programme du robot en cours d'exécution pour corriger un aléa non anticipé et s'adapter

à l'état actuel de la pièce. Cela nécessite l'utilisation de la géométrie réelle pour enrichir la géométrie numérique.

Afin de résoudre ce problème, nous souhaitons utiliser les outils de la réalité augmentée pour réduire la frontière entre réel et virtuel dans ce contexte. Cependant nous avons identifié que le verrou concerne la formalisation des interactions permettant de piloter le robot dans les deux situations.

### 4.3 Une interaction en réalité augmentée

Nous avons identifié plusieurs tâches possibles d'interaction (Ti) que nous avons empiriquement identifiées avec l'aide d'un expert de la mise en œuvre des procédés de fabrication suite aux observations faites lors de la mise en œuvre du procédé de fabrication par projection de poudre et de fabrication par cordon de soudure pour la réalisation de plusieurs pièces mécaniques. Ainsi que sur la base de deux entretiens semi-directifs avec deux utilisateurs expérimentés en impression 3D plastique. Le premier de niveau technicien et l'autre ingénieur de recherche. Ces deux personnes ayant recours à un processus simplifié de la chaîne numérique décrite dans cet article, font usage de la fabrication additive principalement pour du prototypage rapide de pièces mécaniques.

Pour illustrer ces tâches, prenons le cas de la construction d'un mur par un procédé de fabrication additive béton. Lors de la fabrication, un affaissement des couches de béton déposées est détecté par l'opérateur ce qui nécessite l'interruption de la fabrication pour corriger la géométrie. Pour se faire, nous pouvons imaginer que l'opérateur muni d'un casque de réalité augmentée, se trouve placé dans un environnement numérique ancré dans la scène de fabrication réelle comme le propose RoMA pour la phase de conception. Il peut alors suivre l'avancement de la fabrication en comparant le mur en construction (objet réel) avec son modèle FAO (objet numérique). Il est alors capable de déterminer où il manque de la matière et où il faut en ajouter pour corriger l'affaissement et réajuster la hauteur du mur.

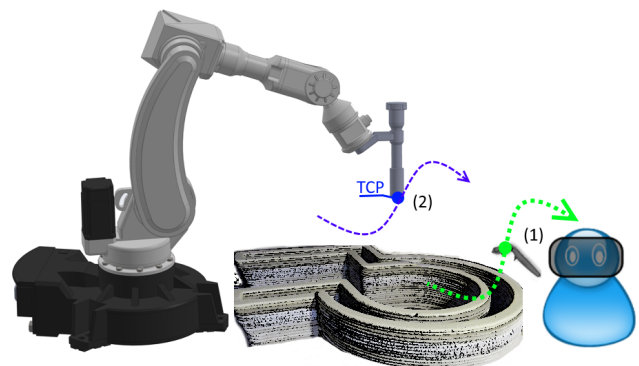


Figure 5: Tâche T1 : (1) Proposition d'interaction en réalité augmentée en associant les mouvements du Motion Controller au TCP (2) pour manipuler librement l'outil dans la repère monde du robot qui est associé à sa base.

Cette correction rentre dans le cadre de la situation 1 (Section 2) où l'opérateur peut : **T1 - contrôler directement l'outil de fabrication**. L'opérateur muni de son casque de réalité augmentée se trouve placé dans la cellule de fabrication enrichie numériquement. Il peut alors choisir le mode de déplacement du robot (dans le repère outil, dans le repère monde ou bien en articulaire) et visualiser les éléments graphiques associés à ces différents modes (repère cartésien ou cercles de rotation associés à l'outil, trajectoires prises, etc).

L'opérateur peut alors par le biais d'un Motion Controller ou directement avec ces mains interagir avec ces éléments graphiques pour piloter le robot. Par exemple si l'opérateur se place dans le repère monde du robot il peut déplacer l'outil en association le centre de l'outil (TCP) au Motion Controller (Figure 5) et effectuer des mouvements libres comme il le ferait en tenant un crayon. Si il le désire, il peut l'utiliser pour saisir les axes XYZ associés à l'outil (Figure 6) pour venir le positionner avec précision contre la surface à corriger. La réalité augmentée permet ici à l'opérateur de mieux s'orienter dans la scène de fabrication et de mieux anticiper le comportement du robot.

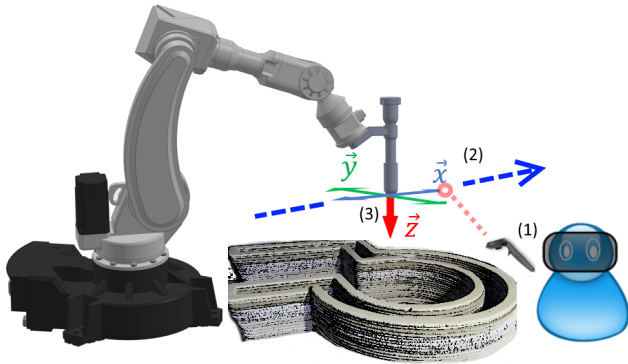


Figure 6: Tâche T1 : (1) Proposition d'interaction en réalité augmentée en utilisant un Motion Controller utilisant la technique de sélection par pointage laser (2) pour saisir le repère associé à l'outil et lui faire faire une translation selon x. (3) Repère associé au TCP pour un contrôle en coordonnées cartésiennes.

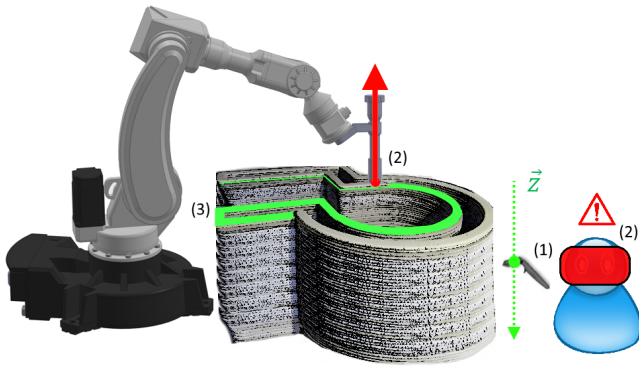


Figure 7: Tâche T2 (1) Proposition d'interaction en réalité augmentée en associant le mouvement dominant du Motion Controller au TCP dans le repère monde associé à la base du robot (2) Indication d'un effort important sur l'outil et réduction du champ de vision de l'utilisateur pour lui indiquer qu'il entre en conflit avec le bridage numérique (3) Bridage géométrique de l'outil limitant son déplacement sur Z localement.

Déplacer l'outil n'est pas suffisant pour permettre la mise en œuvre du procédé. En effet l'opérateur doit pouvoir maîtriser les déplacements de celui-ci pour qu'il respecte les conditions de mise en œuvre du procédé. Par exemple dans le cadre de l'outil de fabrication additive, la qualité du dépôt de matière dépend de la vitesse d'avance, de la distance à la surface et de l'orientation de l'outil. Il est donc indispensable que l'opérateur puisse : **T2 - fixer en temps réel certains paramètres du procédé de fabrication et de définir des**

**limites numériques pour contraindre les mouvements du bras robotisé et de son outil.** Grâce à la réalité augmentée, l'opérateur peut définir des limites géométriques en bloquant localement les déplacements dans une direction (Figure 7, (3)). De la même manière, l'opérateur peut limiter les efforts appliqués sur l'outil et en visualiser une représentation associée à l'outil (Figure 7, (2)), lui permettant de mieux appréhender la tâche qu'il réalise. Il peut alors brider les efforts dans une direction pour contraindre les mouvements du robot au contact d'une surface. Sur cette même interface en réalité augmentée qui remonte à l'opérateur que les déplacements qu'il envoie au robot rentrent en conflit avec les bridages définis (Figure 7, (2)).

Le pilotage manuel des outils de fabrication permet à l'opérateur de projeter le sommet du mur dans des conditions de surfaces permettant de relancer la fabrication. Cependant des modifications importantes de la géométrie nous placent dans la situation 2 où l'opérateur fait le choix de modifier directement le programme machine. Comme il a été mentionné section 2.1, le programme machine peut être représenté sous la forme d'une trajectoire décrivant les déplacements de l'outil (Figure 2, (2)). Dans ce scénario, l'opérateur équipe à nouveau son dispositif de réalité augmentée mais cette fois il visualise devant lui le chemin outil superposé avec le mur en cours de réalisation. L'opérateur va alors pouvoir interagir avec le chemin outil grâce à son Motion Controller ou grâce à un outil de capture de ses mains pour : **T3 - construire, modifier ou supprimer des formes géométriques simples dans un espace 3D en fonction du contexte réel.** L'opérateur va pouvoir ainsi adapter le programme directement depuis la scène de fabrication en fonction de la géométrie réelle de l'objet.

Une telle opération sur le programme machine nécessite de pouvoir : **T4 - simuler localement dans la scène de fabrication réelle la fabrication.** L'opérateur peut ainsi valider les changements avant de relancer la fabrication. La réalité augmentée permet à l'opérateur de visualiser l'opération robotisée au sein de la scène de fabrication réelle en prenant en compte l'état intermédiaire de la pièce fabriquée qui peut dévier significativement du modèle numérique qui a servi à sa construction.

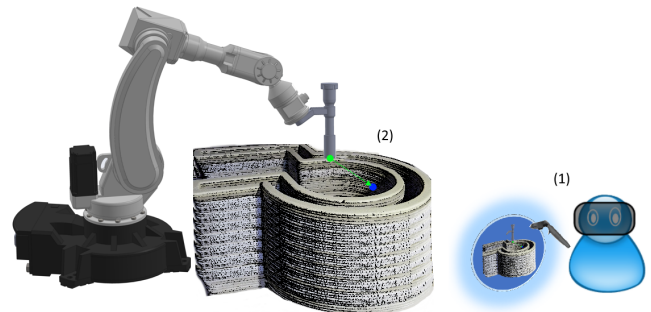


Figure 8: Tâche T5 : (1) Interaction précédente avec une représentation 3D miniaturisée de la scène de fabrication à partir des modèles CFAO et des données de positions de la cellule robotisée (2) afin de piloter l'outil dans une zone cachée de l'utilisateur.

Dans le cadre de la production de pièce de grande dimension, l'accessibilité de l'opérateur avec une surface de l'objet en fabrication peut être réduite. Il est alors nécessaire de revoir les modalités d'interaction avec la cellule de fabrication. En effet l'opérateur peut se retrouver dans une situation où il doit : **Tâche T5 - interagir avec des objets dans un espace de réalité augmenté qui n'est plus à taille humaine.** Nous pouvons comparer cette situation aux interactions que nous pouvons avoir avec un écran géant. De plus, il ne faut pas non plus oublier que l'opérateur évolue dans un

environnement 3D. L'opérateur peut donc être amené à : **Tâche 6 - interagir avec des objets virtuels masqués.** Comment l'opérateur peut-il alors réaliser la prise de contrôle ou la modification du programme machine dans ce type de situation ? Une piste que nous envisageons est par exemple de profiter de la réalité augmentée pour créer une miniaturisation de la scène de fabrication à partir des données de conception et des mesures capteurs faites dans la cellule de fabrication (Figure 8) ; et de se servir de cette miniaturisation pour réaliser les tâches de contrôle manuel du robot ou de modification du programme machine.

Cette mise en application théorique des deux situations permet d'entrevoir différentes problématiques d'interaction et l'intérêt de la réalité augmentée dans le cadre de l'adaptation au cours de la fabrication en permettant de créer un lien entre les données numériques issues de la chaîne numérique et la scène de fabrication réelle.

## 5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le modèle industriel et économique proposé par l'Usine 4.0 remet en question le processus de la chaîne numérique tel qu'il est mis en œuvre pour la fabrication additive. Adopter un point de vue d'Interaction Homme-Machine permet de gagner en flexibilité en introduisant une action humaine dans la cellule de fabrication. A cet effet nous avons proposé de faire évoluer la chaîne numérique pour rompre avec la mise en œuvre actuelle du procédé de fabrication. En proposant une boucle d'interaction qui permet sa mise en œuvre manuelle. Cette approche permet de répondre au problème lié à l'apparition des nombreux aléas produit par le procédé qui sont difficilement prédictibles et donc traitables automatiquement. Cette imprédictibilité renforçant l'intérêt de la présence humaine dans la boucle dont les facultés à traiter l'imprévu dépasse celle de la machine. L'utilisation de la réalité augmentée dans les travaux antérieurs en Interaction Homme-Machine, nous permet d'envisager l'augmentation de la scène de fabrication et de dégager des métaphores d'interaction permettant de répondre à la problématique d'adaptation de la fabrication.

La poursuite de ce travail consiste à identifier formellement des tâches d'interaction dans le contexte de l'adaptation de la stratégie de fabrication. Pour cela nous souhaitons avoir recours à la méthode d'interview pour l'ergonomie prospective décrite par Brangier et al [2] qui permet la génération d'idées innovantes pour des situations de travail en évolution et de les restituer sous la formes de scénarios d'usage. Cette génération d'idée nécessite tout d'abord d'identifier préalablement des choses qui ne font pas (pour nous les limites de la chaîne numérique) et d'imaginer des situations nouvelles (pour nous l'interaction en réalité augmentée avec le procédé de fabrication) afin de pouvoir mener une interview de production d'idées. Elle nécessite ensuite de constituer un groupe d'experts pour lequel nous envisageons : 2 spécialistes en procédés de fabrication, 2 constructeurs de cellule de fabrication additive, 2 opérateurs de cellule de fabrication additive. L'interview commence par un entretien classique pour mener les experts à se créer leur propre futur de la fabrication additive : pourquoi ou comment devrait évoluer la mise en œuvre de la fabrication additive ? Puis de les confronter aux tâches exécutées pendant la chaîne numérique afin de leur faire exprimer comment les choses pourraient évoluer à partir de la situation actuelle. Et enfin de traiter les informations collectées par différentes méthodes d'analyses de discours pour en extraire les tâches d'interactions en réalité augmentée que nous explorerons.

## ACKNOWLEDGMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet Hindcon, financé par l'appel à projet H2020-IND-CE-2016-17 (projet n° 723611).

## REFERENCES

[1] R. Bonnard. *Proposition de chaîne numérique pour la fabrication additive*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, France, 2010.

[2] E. Brangier, B. Brangier, C. Mararche-Francisco, S. Kopp, and J. Clause. Un processus d'interview pour produire une expertise sur l'anticipation des besoins futurs. vers une co-construction de l'expertise prospective dans les domaines des voyages d'affaires et du tourisme. In *Processing of Ergo'IA*, 2018.

[3] W. E. Frazier. Metal additive manufacturing: A review. pp. Volume 23, Issue 6, 1917–1928, 2014.

[4] C. Jasgurpreet and S. Rupinder. Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of fdm parts: A state of art review and future applications. 2017.

[5] A. R. Nassar and E. W. Reutzel. A proposed digital thread for additive manufacturing. In *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings*, 2004.

[6] A. Olwal, C. Lindfors, J. Gustafsson, T. Kjellberg, and L. Mattson. Astor: An autostereoscopic optical see-through augmented reality system. In *Processing of International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 2005.

[7] H. Peng, J. Briggs, C. Wang, K. Guo, J. Kider, S. Mueller, P. Baudisch, and F. Guimbretière. Roma: Interactive fabrication with augmented reality and a robotic 3d printer. In *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2018.

[8] H. Peng, R. Wu, S. Marschner, and F. Guimbretière. On-the-fly print: Incremental printing while modelling. In *Processing of CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2016.

[9] R. Ponche. *Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, France, 2013.

[10] Association Française de Mécanique. *Livre blanc de la recherche en mécanique - Enjeux industriels et sociétaux*. 2015.

[11] A. Teibrich, F. G. S. Mueller, R. Kovacs, S. Neubert, and P. Baudisch. Patching physical objects. In *Processing of Symposium on User Interface Software and Technology*, 2015.

[12] C. Weichel, J. Hardy, J. Alexander, and H. Gellersen. Reform: Integrating physical and digital design through bidirectional fabrication. In *Processing of Symposium on Interface Software and Technology*, 2015.

[13] K. D. Willis, C. Xu, K. Wu, G. Levin, and M. D. Gross. Interactive fabrication: New interfaces for digital fabrication. In *Processing of TEL International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interactions*, 2011.