



HAL
open science

Vers des robots redondants pour l'impression additive dans le bâtiment

Othman Lakhal, Taha Chettibi, Rochdi Merzouki

► **To cite this version:**

Othman Lakhal, Taha Chettibi, Rochdi Merzouki. Vers des robots redondants pour l'impression additive dans le bâtiment. S-MART19, 16^{ème} Colloque National, Apr 2019, Les Karellis - Vallée de la Maurienne, France. hal-02063434

HAL Id: hal-02063434

<https://hal.science/hal-02063434>

Submitted on 11 Mar 2019

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.

Vers des robots redondants pour l'impression additive dans le bâtiment

Othman Lakhal

Université de Lille, CRIStAL, CNRS UMR 9189
Avenue Paul Langevin
Villeneuve d'Ascq – France
othman.lak@gmail.com

Taha Chettibi, Rochdi Merzouki

Université de Lille, CRIStAL, CNRS UMR 9189
Avenue Paul Langevin
Villeneuve d'Ascq – France
rochdi.merzouki@polytech-lille.fr

Résumé— L'idée principale de la fabrication additive est de gérer l'extrusion des matériaux et le dépôt additif de manière à convertir tout ce qui est conçu dans un environnement virtuel en une pièce existante dans un environnement réel. Une machine dédiée à la fabrication additive dans le domaine de la construction a été conçue pour répondre à un besoin très spécifique. En effet, l'objectif vise à automatiser la fabrication additive dans le but d'imprimer des formes géométriques architecturales complexes avec des formes funiculaires avec des courbures complexes. Le prototype proposé pour la fabrication additive se compose d'une plate-forme mobile omnidirectionnelle pour couvrir une grande surface d'impression et d'un manipulateur industriel pour le dépôt de matériaux. Dans ce contexte, la machine doit être capable de reproduire par impression la géométrie de la forme imaginée par les architectes. Un processus de conversion de trajectoire est nécessaire pour calculer les positions effectives des articulations. Cette approche est basée sur une modélisation géométrique inverse (MGI). Ce processus est assez difficile en termes de calcul pour les systèmes redondants. Cet article décrit la modélisation géométrique d'un robot hyper-redondant destiné à la fabrication additive dans le domaine de la construction, en vue de contrôler la trajectoire du dépôt de la matière. Pour cela, une méthode d'optimisation basée sur la programmation quadratique est utilisée. Cette dernière est combinée avec la méthode de Paul pour résoudre la redondance du manipulateur mobile tout en satisfaisant les contraintes de l'environnement d'impression. Le modèle est validé par des simulations et par des expériences.

Mots-clés— Fabrication additive, Manipulateur mobile omnidirectionnelle, Optimisation, Modélisation.

I. INTRODUCTION

La technologie de fabrication additive, connue sous le nom de l'impression 3D, a été identifiée comme l'une des innovations numériques majeures qui ont révolutionné non seulement le domaine de l'industrie, mais aussi celui de la construction. En effet, la fabrication additive dans le secteur du bâtiment est une technique de construction émergente, qui s'inspire des méthodes similaires à l'impression 3D, c'est-à-dire la production d'objets séquentiellement stratifiés [1].

Par ailleurs, la fabrication additive pour le bâtiment est considérée comme une technique innovatrice, économique, abordable et respectueuse de l'environnement. Elle peut également augmenter l'efficacité et la sécurité dans le travail et permet de réduire considérablement le temps de construction [2]. Ainsi, nous pouvons distinguer deux époques dans la construction des bâtiments : une ère préindustrielle, lorsque la

construction des bâtiments se réalisait sur une longue période, unique et personnalisée ; et une ère post-industrielle lorsque la construction des bâtiments est devenue plus rapide en raison de la production de masse, où elle a perdu son caractère unique. Ainsi, la fabrication additive comble le fossé entre la production de masse et la personnalisation. Effectivement, la technique minimise la durée du processus de construction en comparaison avec les méthodes traditionnelles [3]. La société chinoise WinSun a récemment démontré les avantages de l'impression 3D pour le bâtiment en imprimant 10 maisons en moins de 24 heures [4].

Le principe de la fabrication additive existe depuis un moment [5], cependant l'évolution récente de la technologie de dépôt par couches a permis la généralisation de cette technique. En effet, plusieurs projets de la fabrication additive dans la construction ont vu le jour depuis 2010 grâce à la maîtrise de nouveaux matériaux imprimables. Les principales technologies utilisées comprennent principalement l'extrusion de matières de type : ciment, argile, cire, mousse, polymères. A la suite de cette dernière étape, intervient le guidage de la matière déposée, puis la superposition en couches afin de produire en temps optimal des formes géométriquement complexes.

Du point de vue de la recherche, la fabrication additive dans la construction est un processus pluridisciplinaire, couplant entre: la '**Forme**', avec ses propriétés géométriques; la '**Matière**', avec ses caractères de durabilité; et la '**Machine**' avec ses propriétés de productivité. Pour cela, la réalisation d'un concept performant de la fabrication additive dans le cas de la construction des bâtiments repose sur le compromis Forme-Matière-Machine. Ainsi, le développement de machines destinées à la fabrication additive pour le bâtiment est devenu l'objectif de nombreux laboratoires de recherche dans le monde. La fabrication additive utilise le principe du prototypage rapide, permettant d'améliorer les performances liées à la rapidité, la précision et la production répétitive. De nos jours, de nouveaux robots et machines spéciaux ont été développés et utilisés dans la fabrication additive (impression 3D) dans la construction du patrimoine immobilier. Ces systèmes ont été testés soit sur site ou en laboratoire. On distingue deux classes de structures robot/machine, à savoir les structures statiques et mobiles. Des robots cartésiens fixés au sol ont été initialement utilisés pour imprimer en laboratoire des pièces préfabriquées. Les systèmes existants sont basés sur des systèmes à portique, qui ne peuvent imprimer que des structures dont les dimensions sont inférieures à la taille du

portique lui-même. Certains utilisent des systèmes de bras manipulateurs où les dimensions des structures imprimées sont limitées par la portée du bras robotique. Une solution de contournement consiste à imprimer des pièces plus petites, qui peuvent ensuite être assemblées ensemble. La société WinSun a réussi à construire des maisons imprimées par la technologie 3D à partir de matériaux de construction sous la forme d'éléments préfabriqués et assemblés sur un site [6]. Cette solution implique un coût de transport mais génère également des complexités supplémentaires dans la conception et dans les processus d'assemblage. Le plus grand défi auquel est confrontée la fabrication additive est la mise à l'échelle des technologies existantes. C'est ainsi que des robots mobiles (roulants ou volants), combinant les avantages des systèmes de portique avec ceux des robots manipulateurs, sont de plus en plus présents dans le domaine de la fabrication additive dans la construction pour le bâtiment. En effet, cette technologie facilite la mise en place sur chantier et rend la procédure d'impression plus automatisée et plus facile à configurer. Par exemple, l'entreprise de construction hollandaise CyBe, a développé une machine, nommée RC 3Dp. C'était la première machine 3D de béton dotée de chenilles. Cependant, les robots mobiles dédiés à la fabrication additive sont stables au sol avant de lancer la fabrication. La partie mobile n'est utilisée que pour faciliter la mise en place sur chantier. D'autre part, une autre technologie élaborée par les chercheurs du laboratoire des sciences du numérique de Nantes (LS2N), dénommée BatiPrint3D, a été adoptée pour la construction d'un logement 3D [7]. Le concept est constitué d'un bras manipulateur industriel fixé sur un chariot élévateur. Par contre, sa mobilité est réduite.

Dans cet article, nous proposons un système redondant pour la fabrication additive d'une structure monobloc en matériaux cimentaires. Le prototype proposé pour la fabrication additive consiste en une plate-forme mobile omnidirectionnelle pour couvrir une grande surface d'impression et un manipulateur industriel pour le dépôt de matériaux. L'objectif étant d'automatiser la fabrication additive afin d'imprimer des formes géométriques complexes funiculaires ayant, par définition, l'intrados toujours différent de l'extrados et une structure interne de raccord, avec deux types de matériaux spécifiques : un matériau à base d'argile, et un autre à base de ciment. Dans ce contexte, la machine doit être capable de suivre les dimensions ainsi que la géométrie de la forme, complexe et non standard, dessinée par les architectes. Ainsi, afin de respecter parfaitement la géométrie, il est nécessaire d'avoir une commande très précise du positionnement de la buse pour une bonne superposition de couches. Pour cela, une modélisation géométrique est essentielle pour réaliser une loi de commande en position. En effet, pour décrire le mouvement désiré de la buse d'impression dans l'espace opérationnel, le modèle géométrique permet de calculer les positions effectives des articulations. Cependant, l'association des capacités de manipulation du bras manipulateur et de la mobilité de la plate-forme offre une des solutions redondantes pour exécuter une tâche opérationnelle. Cette redondance présente des avantages comme faciliter l'accessibilité sans collision. Mais l'abondance de degrés de liberté conduit à une complexité croissante, liés à la présence d'un nombre d'actionneurs plus que le minimum nécessaire,

pour que le système puisse exécuter sa tâche. De plus, la difficulté rencontrée est la commande précise de la pointe du bras. En effet, le bras du robot est soumis au mouvement relatif entre la base mobile et le manipulateur. Ce mouvement impose une problématique à la commande de la trajectoire de l'effecteur terminal du robot. Certains auteurs [8], décomposent les coordonnées du système en plusieurs mouvements simples et indépendants pour chacun des sous-systèmes. Cela permet de résoudre la redondance en décomposant le système en plusieurs systèmes linéaires. Par ailleurs, dans la littérature, diverses approches de modélisation ont été proposées pour résoudre le problème de la redondance géométrique des systèmes non linéaires. Dans [9], l'auteur utilise une représentation visuelle du système pour minimiser le mouvement d'un manipulateur sous-marin à chaque fois que possible, afin de résoudre la géométrie inverse des systèmes redondants. D'autres auteurs [10] ont proposé une approche basée sur une stratégie de tâche prioritaire pour résoudre la redondance d'un robot mobile manipulateur. Ce dernier est fusionné avec une technique floue pour résoudre la coordination du manipulateur.

Cet article, décrit la résolution de la redondance d'un système hétérogène, manipulateur et plate-forme mobile, tout en exploitant les performances de l'un pour améliorer les limites de l'autre. Ce paramètre est pris en compte dans la modélisation en minimisant le mouvement de la partie mobile. Si la trajectoire d'impression est en dehors de l'espace atteignable du bras manipulateur, la partie mobile est utilisée pour repositionner convenablement la buse d'impression dans son espace opérationnel. Ainsi, le reste de l'article est organisé comme suit. Dans la section 2, nous décrivons le robot manipulateur-mobile. Dans la section 3, nous développons les calculs du modèle géométrique du robot et la stratégie utilisée pour résoudre la redondance du bras manipulateur-mobile. Dans la section 4, nous présentons les résultats obtenus. Dans la section 5, nous discutons des avantages et des contraintes associées à la machine proposée. Enfin, dans la section 6, nous concluons et présentons quelques perspectives.

II. DESCRIPTION DE LA PLATE-FORME

La plate-forme expérimentale développée, appelée robot MATRICE, est un prototype destiné à la fabrication additive dans la construction. Il est composé d'une plate-forme mobile omnidirectionnelle et d'un robot manipulateur industriel à six degrés de liberté (6 ddl) comme le montre la Figure 1.

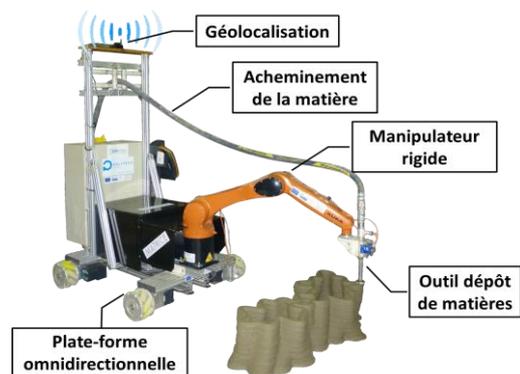


Figure 1. DESCRIPTION DU ROBOT MATRICE

La partie manipulatrice permet de guider la buse d'impression pour un dépôt additif et continu, avec une grande répétabilité et une précision de 0,1mm pour une charge de 10Kg. La plate-forme mobile possède 3ddl sur un plan avec des mouvements linéaires dans les directions longitudinales et latérales, et un mouvement angulaire autour d'un axe perpendiculaire au plan (lacet). Cette mobilité permet de couvrir un grand espace de travail de la zone d'impression, mais aussi, de faciliter les manœuvres et l'installation du robot sur site. La manœuvrabilité de la plate-forme mobile est une propriété importante, car un haut degré de manœuvrabilité (ddm) permet à la plate-forme de se déplacer dans un espace encombré. De plus, le système est équipé de capteurs de localisation, à savoir : des encodeurs, d'une centrale inertielle et d'un système de navigation intérieur. Ce dernier permet d'obtenir l'emplacement d'une balise mobile, installée sur le robot, calculé sur la base de propagation du signal ultrasonique à un ensemble de balises à ultrasons fixes utilisant la trilatération. La précision de la plate-forme mobile est de +/- 1 cm. Par ailleurs, le robot est supervisé par un contrôleur en temps réel, à savoir le CompactRio de National Instruments, pour un pilotage autonome durant l'impression. Les modules d'entrée/sortie ont été configurés pour communiquer avec les différents éléments des robots : la plate-forme mobile, la pompe, la buse, le manipulateur et les capteurs. Les dimensions et le poids (~120Kg) de la machine ont été choisis de manière à assurer facilement son transport. La buse a été dimensionnée pour une largeur du cordon de dépôt de 3cm. La tolérance sur la précision de deux cordons superposés est de +/-1cm.

III. MODELISATION DU MANIPULATEUR-MOBILE

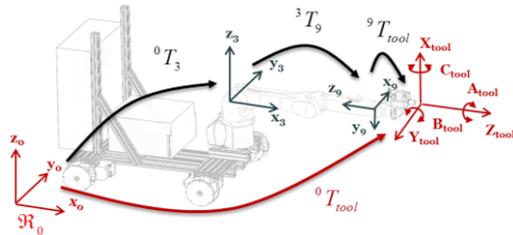


Figure 2. EMBLACEMENT DES REPERES

Pour la modélisation, la base mobile du robot est représentée par un porteur virtuel constitué de 3 ddl. Cela consiste à représenter un corps virtuel sous forme d'une chaîne simple liant la base du bras manipulateur et le repère de référence, comme représenté dans la Figure 3.

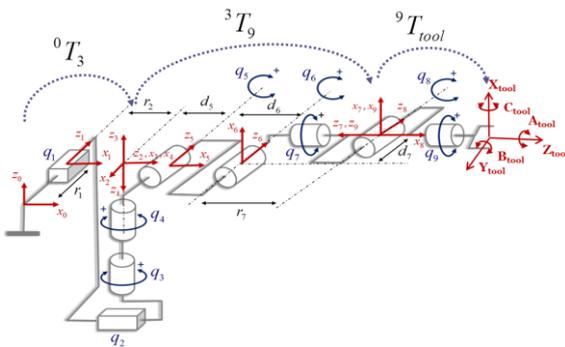


Figure 3. PLACEMENT DES REPERES

Ainsi, la base mobile est modélisée par deux prismatiques q_1 et q_2 et une rotoïde q_3 représentant les trois mouvements possibles. Les variables articulaire $[q_4 \dots q_9]$ représentent les 6 actionneurs du bras manipulateur.

A. Modèle géométrique direct

Le modèle géométrique direct (MGD) représente les relations permettant d'exprimer les positions (X,Y,Z) et les orientations (A,B,C) de la buse du robot en fonction des variables articulaires $[q_1 \dots q_9]$. Pour des chaînes cinématiques ouvertes simples, la méthode la plus utilisée est celle de Denavit-Hartenberg (D-H) [11]. Les paramètres D-H permettent avec le nombre minimum de paramètres d'obtenir les matrices de transformation élémentaire homogène. À partir de la Figure 3, les paramètres de D-H du robot sont listés dans le Tableau 1.

Lien	σ_i	μ_i	α_i	r_i	θ_i	d_i
1	1	1	-90°	q_1	-90°	0
2	1	1	-90°	q_2	-90°	0
3	0	0	90°	0	$-q_3+90°$	0
4	0	0	180°	0	q_4	0
5	0	0	90°	0	q_5	d_5
6	0	0	0°	0	q_6	d_6
7	0	0	-90°	r_7	q_7	d_7
8	0	0	-90°	0	q_8	0
9	0	0	-90°	0	q_9	0

Tableau 1. PARAMETRES DE DENAVIT-HARTENBERG

La matrice ${}^{i-1}T_i$, avec i le nombre d'articulations, est exprimé en fonction des paramètres évoqués dans le tableau ci-dessus :

$$\text{éq. (1): } {}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & d_i \\ \cos(\alpha_i)\sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i)\cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) & -r_i\sin(\alpha_i) \\ \sin(\alpha_i)\sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i)\cos(\theta_i) & \cos(\alpha_i) & r_i\cos(\alpha_i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ainsi, la matrice homogène ${}^0T_{\text{tool}}$ s'exprime sous la forme :

$$\text{éq. (2): } \begin{aligned} {}^0T_{\text{tool}} &= \prod_{i=1}^9 {}^{i-1}T_i \cdot {}^9T_{\text{tool}} \\ &= \underbrace{{}^0T_3(q_1, q_2, q_3)}_{\text{Mobile}} \cdot \underbrace{{}^3T_9(q_4, q_5, q_6, q_7, q_8, q_9)}_{\text{Manipulateur}} \cdot {}^9T_{\text{tool}} \end{aligned}$$

Enfin, le MGD du robot est donné par les 6 équations issues de la matrice ${}^0T_{\text{tool}}$, permettant d'exprimer les poses ($X_{\text{tool}}, Y_{\text{tool}}, Z_{\text{tool}}, A_{\text{tool}}, B_{\text{tool}}, C_{\text{tool}}$) de l'effecteur (Buse) dans le repère \mathfrak{R}_0 .

$$\text{éq. (3): } [X_{\text{tool}} \ Y_{\text{tool}} \ Z_{\text{tool}} \ A_{\text{tool}} \ B_{\text{tool}} \ C_{\text{tool}}]^T = f([q_1 \ q_2 \ \dots \ q_9]^T)$$

B. Modèle géométrique inverse

Pour choisir les configurations de l'ensemble du système satisfaisant les contraintes, il est nécessaire d'avoir les relations entre les variables articulaires $[q_1 \dots q_9]$ et la pose désirées de la buse $[X, Y, Z, A, B, C]$. La difficulté réside dans le fait que le MGD est fortement non linéaire et difficile à inverser directement. Comme nous pouvons le constater dans l'éq. (3) :

il s'agit de 6 équations à 9 inconnues. De plus ces dernières contiennent des fonctions trigonométriques. Soit U une matrice de transformation homogène de dimension (4x4) de la situation désirée de la buse, telle que :

$$\text{éq. (4): } \underbrace{{}^0T_3(q_1, q_2, q_3)}_{\text{Mobile}} \cdot \underbrace{{}^3T_9(q_4, q_5, q_6, q_7, q_8, q_9)}_{\text{Manipulateur}} \cdot {}^9T_{\text{tool}} = U$$

Afin de simplifier les calculs, nous ramenons le repère du centre d'outil (la buse) au repère \mathcal{R}_9 du manipulateur rigide (Figure 2)

$$\text{éq. (5): } \underbrace{{}^0T_3(q_1, q_2, q_3)}_{\text{Mobile}} \cdot \underbrace{{}^3T_9(q_4, q_5, q_6, q_7, q_8, q_9)}_{\text{Manipulateur}} = U \cdot ({}^9T_{\text{tool}})^{-1}$$

On pose :

$$\text{éq. (6): } U \cdot ({}^9T_{\text{tool}})^{-1} = \begin{pmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ainsi par identification des deux membres de l'éq. (5) :, il en résulte les équations suivantes :

$$\text{éq. (7): } \begin{cases} P_x = C_{34}S_{56}d_7 + C_{34}C_{56}r_7 + C_{34}(C_5d_6 + d_5) + q_2 \\ P_y = -S_{34}S_{56}d_7 - S_{34}C_{56}r_7 - S_{34}(C_5d_6 + d_5) + q_1 \\ P_z = C_{56}d_7 - S_{56}r_7 - S_5d_6 \\ n_x = ((C_{34}S_{56}C_7 + S_{34}S_7)C_8 + C_{34}C_{56}S_8)C_9 \\ \quad - (C_{34}S_{56}S_7 - S_{34}C_7)S_9 \\ n_y = ((-S_{34}S_{56}C_7 + C_{34}S_7)C_8 - S_{34}C_{56}S_8)C_9 \\ \quad - (-S_{34}S_{56}S_7 - C_{34}C_7)S_9 \\ n_z = (C_{56}C_7C_8 - S_{56}S_8)C_9 - C_{56}S_7S_9 \\ o_x = -((C_{34}S_{56}C_7 + S_{34}S_7)C_8 + C_{34}C_{56}S_8)S_9 \\ \quad - (C_{34}S_{56}S_7 - S_{34}C_7)C_9 \\ o_y = -((-S_{34}S_{56}C_7 + C_{34}S_7)C_8 - S_{34}C_{56}S_8)S_9 \\ \quad - (-S_{34}S_{56}S_7 - C_{34}C_7)C_9 \\ o_z = -(C_{56}C_7C_8 - S_{56}S_8)S_9 - C_{56}S_7C_9 \\ a_x = (C_{34}S_{56}C_7 + S_{34}S_7)S_8 - C_{34}C_{56}C_8 \\ a_y = (-S_{34}S_{56}C_7 + C_{34}S_7)S_8 + S_{34}C_{56}C_8 \\ a_z = C_{56}C_7S_8 + S_{56}C_8 \end{cases}$$

Où : S_i et C_i représentent les fonctions sinus et cosinus de q_i respectivement et S_{ij} et C_{ij} les sinus et cosinus de q_i+q_j respectivement.

Le MGI du système consiste à résoudre le système d'éq. (7) :. Nous pouvons constater que si les variables q_1, q_2 et q_3 sont déterminés, les variables q_4, q_5, q_6, q_7, q_8 et q_9 peuvent être calculées.

1) Identification des contraintes

Notre objectif n'est pas seulement la réalisation d'une tâche opérationnelle, mais aussi la manière dont elle doit être réalisée. En effet, certaines configurations du bras manipulateur ou de l'ensemble du système sont inutiles ou à éviter. Par exemple, les configurations singulières de la partie manipulatrice doivent être évitées. Ainsi, celle entraînant une

collision avec une des parties composantes du robot (plateforme, armoire électrique...). Le dépôt de matière vers l'arrière n'est par exemple pas nécessaire.

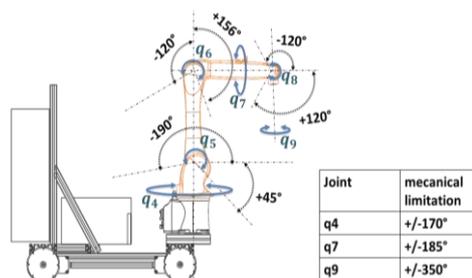


Figure 4. CONFIGURATION INITIALE ET LIMITES MECANQUES DES JOINTS DE LA PARTIE MANIPULATRICE

Il faut ajouter que certaines configurations peuvent également être limitées par la longueur du conduit flexible de la matière. Ces contraintes peuvent donc se résumer comme suit :

$$\text{éq. (8): } \begin{cases} -30^\circ \leq q_4 \leq 30^\circ \\ -90^\circ \leq q_5 \leq 0^\circ \\ 0^\circ \leq q_6 \leq 90^\circ \\ -30^\circ \leq q_7 \leq 30^\circ \\ 0^\circ \leq q_8 \leq 90^\circ \\ q_9 = 0^\circ \end{cases}$$

L'ensemble des contraintes formulé est utilisé pour déterminer les bornes du sous-espace de travail du manipulateur, que nous appellerons zone d'impression, comme illustré sur la Figure 5.

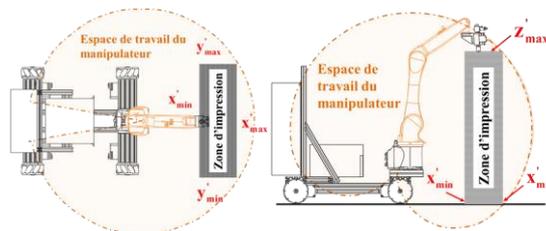


Figure 5. ZONE D'IMPRESSON

Ce dernier représente l'ensemble des positions et orientations accessibles par la buse lorsque les points cibles ne nécessitent pas le mouvement de la plateforme mobile. Si la trajectoire d'impression est en dehors de la zone d'impression, la partie mobile est utilisée pour repositionner convenablement le système.

2) Calcul des variables articulaires $[q_1, q_2, q_3]$ de la plateforme mobile

Le robot peut imprimer des structures à grande échelle puisque la plateforme a un espace de travail illimité. Cependant, une faible rotation des actionneurs rotatifs loin de l'organe terminal implique un déplacement important de l'organe terminal. De plus, différents phénomènes comme le glissement, les jeux dans les moteurs-roues accentuent cet effet de démultiplication de l'erreur. Dans ce cas, pour minimiser l'erreur de localisation, le nombre de déplacement de la partie mobile doit être réduit le long de la trajectoire. Cela peut être traduit par un problème d'optimisation dans lequel on cherchera

à obtenir les meilleures solutions pour les variables articulaires q_1, q_2 et q_3 satisfaisant les contraintes. A partir de l'éq. (7) :et des contraintes sur l'espace de travail du bras manipulateur (Figure 5), nous obtenons les inéquations suivantes :

$$\text{éq. (9): } \begin{cases} X'_{\max} \geq p_y S_3 - q_1 S_3 + p_x C_3 - q_2 C_3 \geq X'_{\min} \\ Y'_{\max} \geq -p_x S_3 + p_y C_3 - q_1 C_3 + q_2 S_3 \geq Y'_{\min} \end{cases}$$

Où $X'_{\max}, X'_{\min}, Y'_{\max}$ et Y'_{\min} représentent les bornes de la zone d'impression dans le repère \mathcal{R}_0 .

Pour résoudre l'inéquation éq. (9) :et obtenir les variables articulaires q_1 et q_2 , nous avons utilisé une technique d'optimisation basée sur la programmation quadratique [12] à l'aide de l'algorithme du convexe de point intérieur, disponible avec la fonction 'quadprog' sous Matlab. La méthode consiste à minimiser la fonction objective :

$$\text{éq. (10): } \min \left((P_x - q_2)^2 + (P_y - q_1)^2 \right)$$

Ce critère permet de sélectionner la configuration la plus proche de la plate-forme mobile, elle peut être réécrite comme suit:

$$\text{éq. (11): } \min_x \frac{1}{2} x^T H x + g^T x \text{ de sorte que } \begin{cases} A \cdot x \leq b \\ A_{eq} \cdot x = b_{eq} \\ lb \leq x \leq ub \end{cases}$$

Avec

$$\text{éq. (12): } \begin{aligned} H &= \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}; \\ g &= [-2P_x \quad -2P_y]^T; \\ A &= \begin{bmatrix} -C_3 & -S_3 & C_3 & S_3 \\ S_3 & -C_3 & -S_3 & C_3 \end{bmatrix}^T; \\ b &= \begin{bmatrix} -Y'_{\min} \\ -X'_{\min} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_3 & S_3 \\ -S_3 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_y \\ P_x \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} Y'_{\max} \\ X'_{\max} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_3 & S_3 \\ -S_3 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_y \\ P_x \end{bmatrix} \end{aligned}$$

La variable q_3 peut être utilisée pour compenser les limites de q_4 . Cependant, dans le domaine de la fabrication additive, il est important d'éviter les collisions avec la structure à imprimer. Ainsi, q_3 est obtenue en utilisant le vecteur unitaire normal sur chaque point de la trajectoire d'impression afin d'être toujours face à la structure pendant l'impression, comme illustré dans la Figure 6.

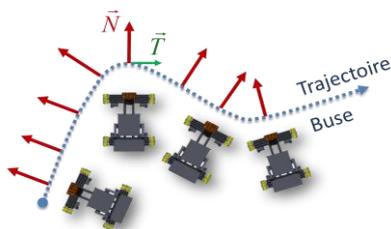


Figure 6. ORIENTATION DE LA PLATE-FORME MOBILE PAR RAPPORT A LA TRAJECTOIRE D'IMPRESSION

3) Calcul des variables articulaires $[q_4, q_5 \dots q_9]$ du manipulateur

Les variables q_1, q_2, q_3 étant connues, il est possible à présent de calculer les variables $q_4, q_5, q_6, q_7, q_8,$ et q_9 . Pour cela, il existe un certain nombre de méthodes pour calculer le MGI, notamment la méthode de Paul [13] qui traite séparément chaque cas particulier et qui convient pour la plupart des robots industriels. La méthode consiste à pré-multiplier successivement les deux membres de l'équation par les matrices ${}^{i-1}T_i$, permettant d'isoler et d'identifier l'une après l'autre les variables articulaires à rechercher. La séquence d'équations permettant le calcul des q_i restants est la suivante :

$$\text{éq. (13): } \begin{aligned} {}^4T_3 {}^3T_0 U^{tool} T_9 &= {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_7 {}^7T_8 T_9 \\ {}^5T_4 {}^4T_3 {}^3T_0 U^{tool} T_9 &= {}^5T_6 {}^6T_7 {}^7T_8 T_9 \\ {}^6T_5 {}^5T_4 {}^4T_3 {}^3T_0 U^{tool} T_9 &= {}^6T_7 {}^7T_8 T_9 \\ {}^7T_6 {}^6T_5 {}^5T_4 {}^4T_3 {}^3T_0 U^{tool} T_9 &= {}^7T_8 T_9 \\ {}^8T_7 {}^7T_6 {}^6T_5 {}^5T_4 {}^4T_3 {}^3T_0 U^{tool} T_9 &= {}^8T_9 \end{aligned}$$

IV. RESULTATS :

A. Simulations

Les simulations ont été réalisées avec Matlab-Simulink en utilisant un processeur Intel Core (TM) i5-4590s à 3 GHz.

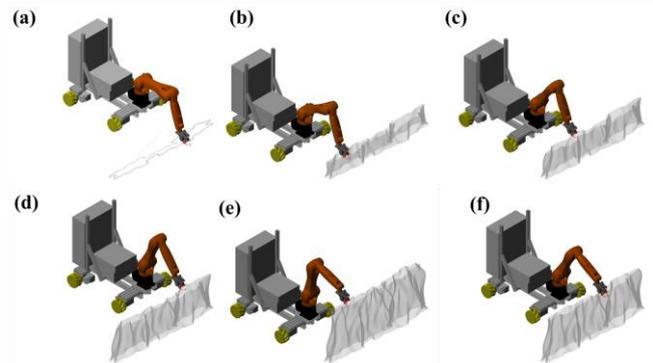


Figure 7. SIMULATION DU PARCOURS DU ROBOT : IMPRESSION D'UN OBJET DE GRANDE TAILLE

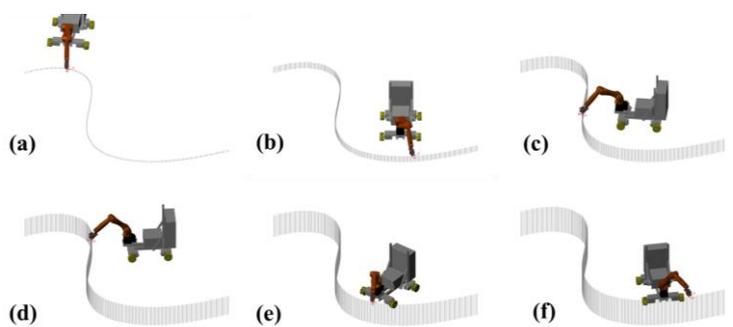


Figure 8. SIMULATION DU PARCOURS DU ROBOT : IMPRESSION D'UN OBJET DE TRÈS GRANDE TAILLE

Les Figures Figure 7 et Figure 8 présentent les résultats de simulation obtenus pour une impression d'objet de grande et très grande taille, respectivement.

B. Expérimentations



Figure 9. FABRICATION ADDITIVE AVEC LE ROBOT MATRICE

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente une vue d'ensemble des objets 3D imprimés à l'aide du robot MATRICE.

V. DISCUSSIONS

La simulation est une étape essentielle permettant de prédire le comportement et de valider le parcours du robot du début à la fin sur le trajet de la forme architecturale à imprimer. Cette étape vérifie si les solutions fournies par le MGI répondent aux différentes contraintes, notamment les contraintes de sécurité, la collision avec la structure imprimée, les configurations particulières, etc. Comme certaines formes étaient de dimension différente, l'une des problématiques de la préparation des formes à l'impression était de s'assurer que toutes les trajectoires sont atteignables par le robot. Le temps de calcul du MGI est estimé à 0,003s, permettant d'implémenter l'algorithme en temps réel.

Lors de la commande du dépôt de matière l'incertitude obtenue est inférieure à 10mm avec une vitesse linéaire moyenne de 50mm/s. Sachant que la buse d'impression considérée a un diamètre de 14mm pour le cas du ciment et de 17mm pour l'argile. En fait, cette erreur de 4 à 7 mm dans le positionnement du dépôt de matière n'affecte pas globalement la forme de l'objet imprimé avec les dimensions requises dans le projet MATRICE, en particulier pour la forme fermée.

VI. CONCLUSION

Dans cet article, une méthodologie de résolution d'un modèle géométrique inverse pour un robot hybride et redondant, destiné à la fabrication additive dans la construction, par la technique de dépôt additif. Le robot manipulateur mobile étudié a été contrôlé en position. Une méthode d'optimisation basée sur la programmation quadratique est combinée avec la méthode de Paul ont été utilisées pour résoudre la redondance du manipulateur mobile tout en satisfaisant les contraintes liées à l'environnement d'impression. Cela a permis d'éviter certaines configurations bloquantes pour la commande et à minimiser les imprécisions dues au déplacement de la partie mobile. Les résultats de simulation et expérimentaux ont montré les performances attendues. Dans les travaux futurs, l'utilisation de configurations redondantes pour atteindre des objectifs auxiliaires tels que l'évitement d'obstacles et l'impression dans un environnement dynamique peut être envisagée dans la modélisation. De plus, Nous souhaitons en perspectives améliorer le contrôle de qualité en utilisant le

même robot, par la mise en place de préhenseur souple, permettant de scanner les surfaces imprimables.

VII. REMERCIEMENT

Ce travail de recherche a été mené dans le cadre du projet **MATRICE**, cofinancé par le Fonds Européen De Développement Régional et la région des Hauts-de-France.

VIII. REFERENCES

- [1] A. Willette, S. Brell-Cokcan, J. Braumann. "Robotic fabrication in architecture, art and design". Springer Science & Business Media. 2014
- [2] R. Mathur. "3D Printing in Architecture". International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology, Vol N°3, N° 2348-7968. 2016
- [3] C. M. Rouhana, M. S. Aoun, F. S. Faek, M. S. Eljazzar, F. R. Hamzeh. "The reduction of construction duration by implementing contour crafting (3D printing)." Proceedings for the 22nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Vol. 22.R. 2014
- [4] K. Charron. "WinSun China builds world's first 3D printed villa and tallest 3D printed apartment building." 3ders.org, 2015
- [5] B. Khoshnevis, D. Rosanne. "Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials." Materials Technology 13.2 : 53-56. 1998
- [6] I. Hager, G. Anna, P. Roman. "3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction?" Procedia Engineering 151: 292-299. 2016
- [7] B. Furet, S. Garnier, E. Paquet, K. Subrin. " La robotique au service de la construction par impression 3D ", 15eme Colloque AIP PRIMECA à La Plagne 2017 le 12 et 14 avril 2017
- [8] M. S. Haddad, S. Hanchi, H. E. Lehtihet. "Point-to-point trajectory planning of wheeled mobile manipulators with stability constraint. Extension of the random-profile approach." European Journal of Mechanics-A/Solids 28.3: 477-493. 2009
- [9] C. H. Dos Santos, R. Guenther, D. Martins, E. R. De Pieri, "Virtual kinematic chains to solve the underwater vehicle-manipulator systems redundancy." Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 28.3: 354-361. 2006
- [10] G. Antonelli, C. Stefano. "Fuzzy redundancy resolution and motion coordination for underwater vehicle-manipulator systems." IEEE Transactions on Fuzzy Systems 11.1: 109-120. 2003
- [11] R. S. Hartenberg, J. A. Denavit. "A kinematic notation for low pair mechanisms based on matrices." Journal of Applied Mechanics. Appl. Mech. 77 : 215-221. 1955
- [12] Boggs, Paul T., and Jon W. Tolle. "Sequential quadratic programming." Acta numerica 4 (1995): 1-51.
- [13] R. Paul. "Robot manipulators: mathematics, programming, and control". The computer control of robot manipulators". 1981.