

Étude des propriétés vibratoires d'un système robotique en opération de meulage par modélisation multi-corps flexibles

Thomas SANTOS^a, Zhaoheng LIU^a et Bruce HAZEL^b

- a. Département de génie mécanique, École de technologie supérieure (ÉTS), Montréal, Québec, Canada
b. Expertise robotique et civil, Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ), Varennes, Québec, Canada

Résumé :

Un robot compact à 6 degrés de liberté dédié à la réparation d'équipements hydroélectriques est étudié dans cet article. Cet outil multitâche étant spécialement conçu pour travailler dans des endroits confinés et dans des conditions difficiles, il est sujet à des flexibilités au niveau des membrures et des joints. Ce document présente donc la modélisation numérique du robot en opération de meulage. Une attention particulière est portée sur les caractéristiques non-linéaires des joints et la déformation élastique des membrures flexibles. Le robot peut donc être étudié sur la trajectoire de l'effecteur pendant l'usinage ainsi que ses modes vibratoires.

Abstract :

A compact 6 DOF robot dedicated to in-situ repairs of hydroelectric equipment is studied in this paper. Since this multitasking tool is designed to work in confined spaces and in harsh conditions, it is subject to flexible-links and flexible-joints. This paper presents the numerical modelling of the robot during a grinding process. This work is focused on the non-linear characteristics of flexible-joints and the elastic deformation of flexible-links. The robot can thus be studied on its vibration modes and the trajectory of its end-effector during the machining.

Mots clefs : meulage robotisé, joints et membrures flexibles, vibration, réducteur harmonique, éléments-finis

1 Introduction

Dans le but d'optimiser ses procédés de réparation et d'entretien des roues de turbines, Hydro-Québec a mis au point une technologie de robot à six degrés de liberté qui porte le nom de SCOMPI [1, 2]. Plusieurs générations ont été développées dont la première au début des années 1990. Ce robot peut effectuer différentes opérations comme le meulage (figure 1), le soudage, le martelage, le polissage et d'autres procédés. Cet outil multitâche a spécialement été conçu pour travailler dans des endroits confinés et dans des conditions difficiles, ce qui en fait un robot léger avec des capacités importantes en termes de force applicable à l'effecteur et d'extension du bras. La figure 2 [9] présente le schéma cinématique du robot (L1-L6 : membrures, J1-J6 : joints, R0 : rail).

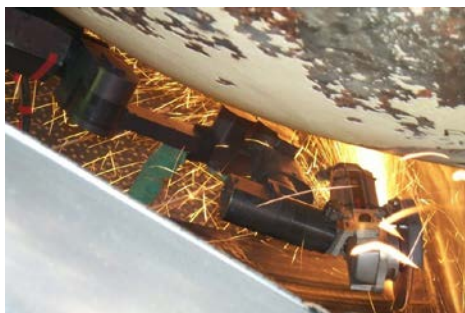


FIG. 1 – Le robot en phase de meulage

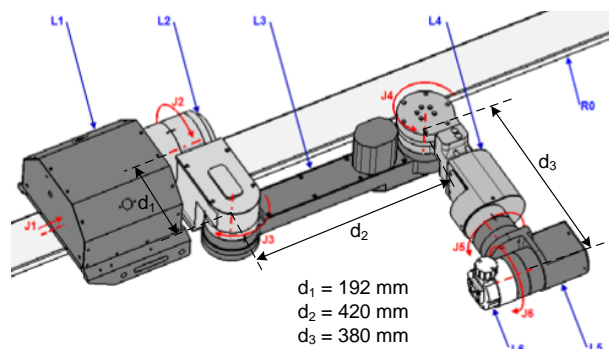


FIG. 2 – Schéma cinématique du robot

Dans l'industrie actuelle, de nombreux outils sont disponibles pour modéliser des systèmes mécaniques (CAO, DAO, EF). Cependant, dans l'optique de modéliser la cinématique du robot avec des joints et membrures flexibles dans le même environnement, il faut utiliser un autre type de logiciel, un logiciel dit multi-corps. Ainsi grâce à cette catégorie de logiciel énormément d'informations sont exploitables, que ce soit des informations en cinématique ou en dynamique (efforts, modes vibratoires, etc.). Pour cette étude, le logiciel multi-corps MD Adams 2012 est utilisé en parallèle avec Patran 2012 (logiciel éléments-finis) pour déterminer les composantes vibratoires des membrures et les insérer ensuite dans le logiciel MD Adams. Les deux logiciels sont développés par MSC Software qui compte un grand nombre de logiciels spécialisés dans la simulation numérique de systèmes.

Depuis de nombreuses années, des études ont été menées afin de caractériser au mieux les réducteurs harmoniques [3-6] qui sont la principale source de flexibilité des joints du robot SCOMPI. Ensuite des recherches se sont concentrées sur le contrôle des joints utilisant cette technologie pour en limiter les vibrations [7]. D'autre part, afin d'étudier la flexibilité des membrures avec la flexibilité des joints, des études analytiques ont été menées sur des robots à faible degrés de liberté [8]. Plus récemment, une première étude dynamique du robot SCOMPI a été réalisée avec le logiciel multi-corps en mettant en évidence les modes vibratoires et les défauts de trajectoires [9]. Dans ce qui suit, la modélisation des joints et des membrures flexibles sera présentée. La flexibilité non-linéaire, l'hystérésis et l'erreur cinématique des joints ainsi que la propriété élastique des membrures seront prises en considération dans le modèle. L'objectif est de mettre en évidence leurs effets sur le comportement vibratoire du système robotique.

2 Modélisation du robot

La modélisation commence tout d'abord par la création d'un modèle rigide du robot SCOMPI sur le logiciel MD Adams. Il s'agit de l'élément de base de toute modélisation plus complexe. Une attention particulière est portée sur la création des membrures en monobloc. En effet les membrures sont des assemblages vissés et les fichiers CAD doivent donc être modifiés pour que les assemblages deviennent des pièces.

Une fois cette première approche faite, les joints et membrures peuvent être rendu flexibles.

2.1 Modélisation des joints

Pour la flexibilité des joints en rotations, trois phénomènes sont modélisés : la flexibilité non-linéaire, l'hystérésis et l'erreur cinématique. Un protocole expérimental a été mené sur le robot SCOMPI afin de déterminer les raideurs des joints [9]. Celles-ci ont été comparées aux raideurs théoriques en prenant en compte les raideurs fabricants des moteurs et des réducteurs harmoniques. Les résultats se sont avérés très proches hormis la raideur du joint 2. En effet, la raideur expérimentale de ce joint s'est retrouvé plus de 3 fois inférieure à la raideur théorique. En rajoutant la raideur en torsion du rail à la raideur théorique, la raideur expérimentale ne lui est plus que 2 fois inférieure.

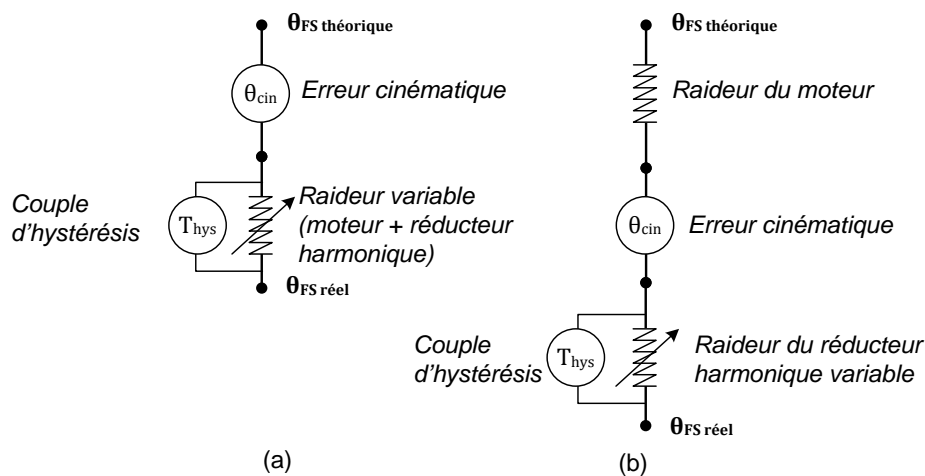


FIG. 3 – Modélisations des joints, (a) raideurs expérimentales, (b) raideurs théoriques

Comme les phénomènes modélisés sont essentiellement présents dans les réducteurs harmoniques, deux modèles seront comparés. Le premier prenant en compte les raideurs expérimentales (englobant tous les composants des joints) et le second différenciant les raideurs des moteurs à celles des réducteurs harmoniques (figure 3).

Afin de modéliser la flexibilité des joints dans MD Adams, une pièce fictive est rajoutée à chaque liaison. C'est cette pièce qui est commandé en rotation (θ_{FS} théorique). Elle sera reliée à la membrure à déplacer par un couple. Ce même couple est déterminé par une formule décrivant la modélisation des joints (figure 3).

2.1.1 Non-linéarité de la flexibilité et hystérésis

La non-linéarité d'un réducteur harmonique est modélisée en trois zones de couples [10]: faibles, moyens et élevés. La différence de raideur entre la zone deux et trois est très légère (inférieur à 10% pour les réducteurs utilisés). Cependant, la différence entre la zone de couples faibles et moyens est très importante, environ 60% d'augmentation de la raideur. La non-linéarité est donc modélisée en deux zones avec une augmentation de la raideur de 60% pour la seconde zone. La figure 4 montre la raideur du joint 3 en fonction de la déformation du réducteur.

Ensuite, l'hystérésis est introduite sur cette raideur non-linéaire. Elle est directement fonction de la vitesse de déformation du joint [11]. Suivant le sens de rotation du réducteur harmonique, la flexibilité de celui-ci sera différente. La figure 4 présente la forme de la raideur du joint 3 en prenant en compte la non-linéarité ainsi que l'hystérésis. Les raideurs des autres joints sont de la même forme.

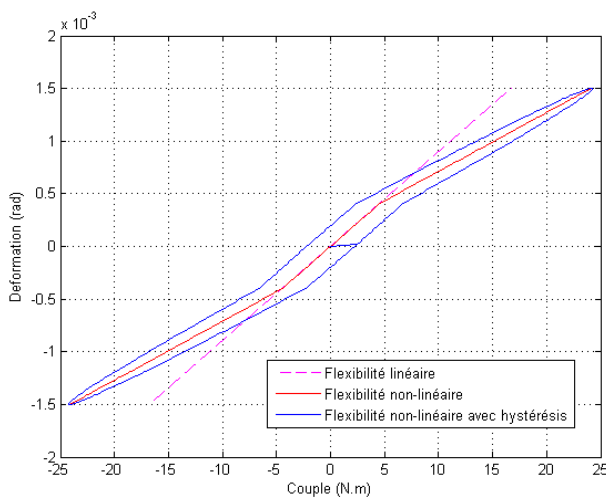


FIG. 4 – Flexibilité du joint 3

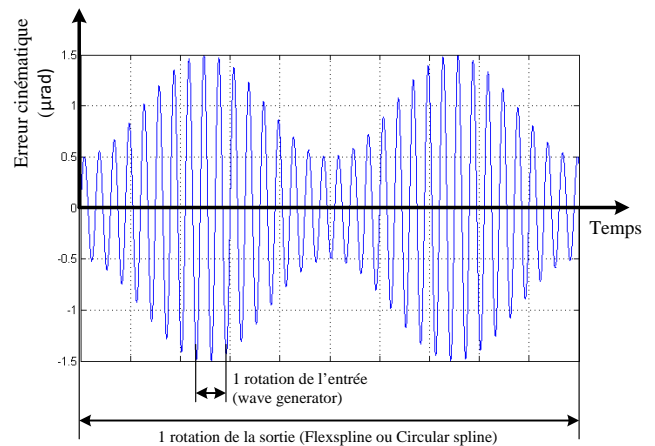


FIG. 5 – Courbe de tendance de l'erreur cinématique dans un réducteur harmonique à vitesse constante

2.1.2 Erreur cinématique

L'erreur cinématique est un phénomène très important dans un réducteur harmonique surtout lorsque celui-ci est utilisé dans la mécanique de précision. Il s'agit de la différence entre la position espérée en sortie de réducteur et la position réelle de cette sortie. La relation suivante exprime l'erreur cinématique avec θ_{in} la position angulaire de l'entrée, ratio le rapport de réduction et θ_{out} la position angulaire de la sortie du réducteur harmonique.

$$\theta_{cin} = \frac{\theta_{in}}{ratio} - \theta_{out} \quad (1)$$

Expérimentalement, les catalogues fabricants reportent que la magnitude varie périodiquement à une fréquence de deux fois la vitesse de rotation de l'entrée du réducteur (le wave generator du réducteur). De plus, la magnitude module aussi deux fois par cycle de la sortie du réducteur (la flexspline du réducteur). En considérant une vitesse de rotation constante, la forme de l'erreur cinématique est présentée sur la figure 5.

2.2 Modélisation des membrures flexibles

La modélisation des membrures se fait en deux étapes. Tout d'abord, un premier travail est effectué sur le logiciel élément finis. Chaque membrure est maillée, les propriétés matériaux leurs sont appliquées. Ensuite, des nœuds sont rajoutés à l'emplacement des liaisons. Ceux-ci vont directement servir dans le logiciel multi-corps à positionner les membrures puis à les connecter aux différentes liaisons. Pour relier les nœuds de liaisons à la membrure, des corps rigides sont insérés entre ce nœud et les nœuds de la membrure les plus proches (en rose sur la figure 6).

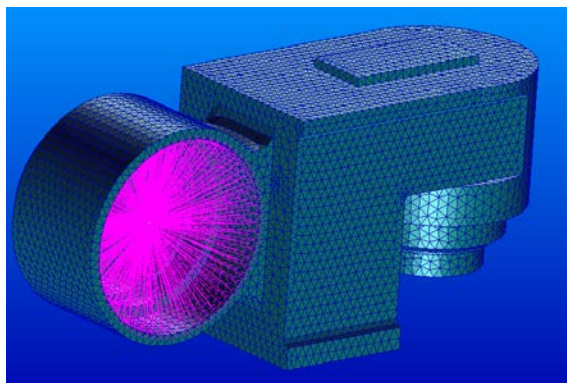


FIG. 6 – Maillage de la membrure 2 sous Patran

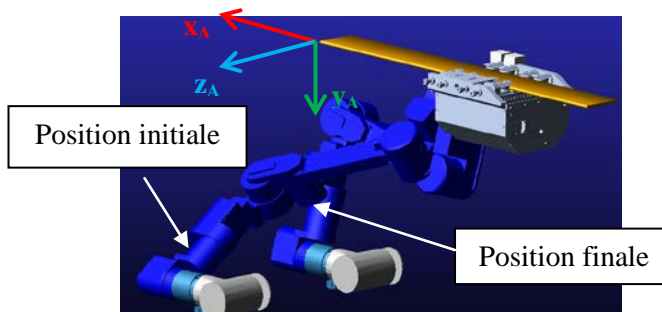


FIG. 7 – Position initiale puis finale du robot pendant la simulation

Une fois la procédure terminée, des fichiers *.mnf sont exportés. Chaque fichier comprend les données sur chaque membrure : la masse, les moments d'inertie, la position du centre de masse, la matrice de raideur et de masse, les modes vibratoires.

La seconde étape consiste juste à remplacer les pièces rigides dans le modèle Adams par les pièces flexibles via les fichiers *.mnf. Une fois les pièces flexibles bien positionnées le modèle est opérationnel.

3 Résultats numérique

Dans cette partie concernant les simulations numériques, les deux modélisations des joints (figure 3, a et b) sont utilisées avec un outil de meulage installé à l'effecteur afin de voir le comportement de celui-ci lorsqu'il est excité par des efforts périodiques. Les modes vibratoires des deux modélisations sont aussi comparés.

Pour correspondre à une meule standard, un balourd de 4 gr à 0.01 m de l'axe de rotation est installé. Ceci correspond à la force de déséquilibre d'une meule de 1.9 kg avec un offset de 0.5 mm. Ensuite, une force de contact sinusoïdale d'une amplitude de 10 N est installée. La vitesse de rotation de la meule est de 6000 tr/min.

3.1 Simulation avec commande en position

Le modèle Adams du robot est commandé en position. Les commandes des six joints sont obtenues par l'outil utilisé par le robot SCOMPI pour définir sa trajectoire. Pour notre étude, le robot SCOMPI effectue une translation de 498 mm à une vitesse constante de 80 mm/sec en 6.35 secondes (figure 7).

3.2 Trajectoire de l'effecteur et étude vibratoire

En analysant les projections de la trajectoire de l'effecteur du robot dans le repère SCOMPI (figure 9), il est à noter qu'avec les mêmes paramètres d'hystérésis et d'erreur cinématique ceux-ci donnent des résultats bien différents. La modélisation avec les raideurs expérimentales est beaucoup plus importante en termes d'amplitude comparativement à la modélisation avec les raideurs théoriques. De plus, suivant l'axe y la modélisation avec les raideurs expérimentales est très éloignée de la trajectoire souhaitée pour le robot (courbe rouge sur la figure 9) en début de simulation, de l'ordre de 5mm. Contrairement à la modélisation avec les raideurs théoriques qui malgré les oscillations reste proche de la trajectoire souhaitée.

Les oscillations nous montrent des fréquences naturelles de l'ordre de 10 Hz ce qui correspond aux premières fréquences propres du robot.

Lorsque l'on observe les modes vibratoires sur deux positions du robot (la position initiale de la simulation et la position finale) celles-ci se trouvent dans le même ordre de grandeur (voir figure 8). La modélisation avec

les raideurs théoriques donne cependant des fréquences naturelles plus importantes que la modélisation avec les raideurs expérimentales.

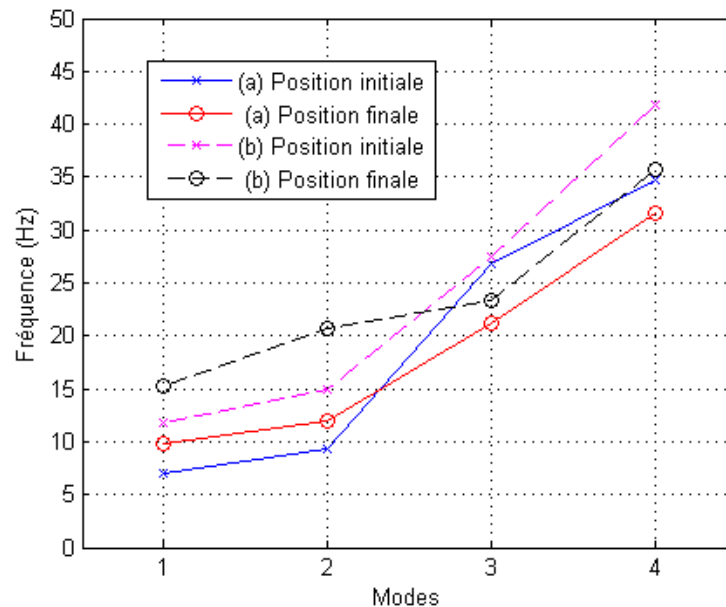


FIG. 8 – Modes vibratoires dans deux positions des deux modélisations de joints

4 Conclusion

Dans ce document, il a été présenté la stratégie de modélisation du robot SCOMPI afin d'étudier son comportement lors d'une phase de meulage. Cette modélisation comporte donc des membrures et joints flexibles. Plusieurs phénomènes importants ont été mis en place dans la modélisation des joints. Il a été montré que grâce à cette modélisation les premiers modes vibratoires du robot sont retrouvés. La prochaine étape consiste donc à réaliser des trajectoires avec le robot SCOMPI et de les comparer avec le modèle numérique afin d'optimiser celui-ci. Ainsi, il sera possible dans l'avenir d'anticiper le comportement vibratoire du robot pour des phases d'usinage.

References

- [1] Hazel, B., J. Côté, Y. Laroche et P. Mongenet. 2012a. « A portable, multiprocess, track-based robot for in situ work on hydropower equipment ». *Journal of Field Robotics*, vol. 29, no 1, p. 69-101.
- [2] Hazel, B., J. Côté, Y. Laroche et P. Mongenet. 2012b. « Field repair and construction of large hydropower equipment with a portable robot ». *Journal of Field Robotics*, vol. 29, no 1, p. 102-122.
- [3] Tuttle, Timothy D. 1992. *Understanding and Modeling the Behavior of a Harmonic Drive Gear Transmission*. Massachusetts Institute of Technology.
- [4] Seyfferth, W, AJ Maghzal et Jorge Angeles. 1995. « Nonlinear modeling and parameter identification of harmonic drive robotic transmissions ». *Proceedings : 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nagoya, Japan, May 21-27, 1995, p. 3027-3032.
- [5] Ghorbel, Fathi H., Prasanna S. Gandhi et Friedhelm Alpeter. 2001. « On the Kinematic Error in Harmonic Drive Gears ». *Journal of Mechanical Design*, vol. 123, no 1, p. 90-97.
- [6] Dhaouadi, R., et F. H. Ghorbel. 2008. « Modelling and analysis of nonlinear stiffness, hysteresis and friction in harmonic drive gears ». *International Journal of Modelling and Simulation*, vol. 28, no 3, p. 329-36.
- [7] Mohamed, Z., et M. O. Tokhi. 2004. « Command shaping techniques for vibration control of a flexible robot manipulator ». *Mechatronics*, vol. 14, no 1, p. 69-90.
- [8] Li, J., Z. Liu, M. Thomas et B. Hazel. *Dynamic analysis of flexible-link and flexible-joint manipulator for high speed motion*. Montréal: École de technologie supérieure, 20 p.
- [9] Swiatek, G., Z. Liu et B. Hazel. 2010. « Dynamic simulation and configuration dependant modal identification of a portable flexible-link and flexible-joint robot ». *28th seminar on machinery vibration* - www.cmva.com, Université Laval, Québec, p. 189-206.

[10] Harmonic Drive AG. 2011. Digital Catalogue - Precision in motion. Germany, 528 p.

[11] Tuttle, Timothy D. 1992. Understanding and Modeling the Behavior of a Harmonic Drive Gear Transmission. Massachusetts Institute of Technology.

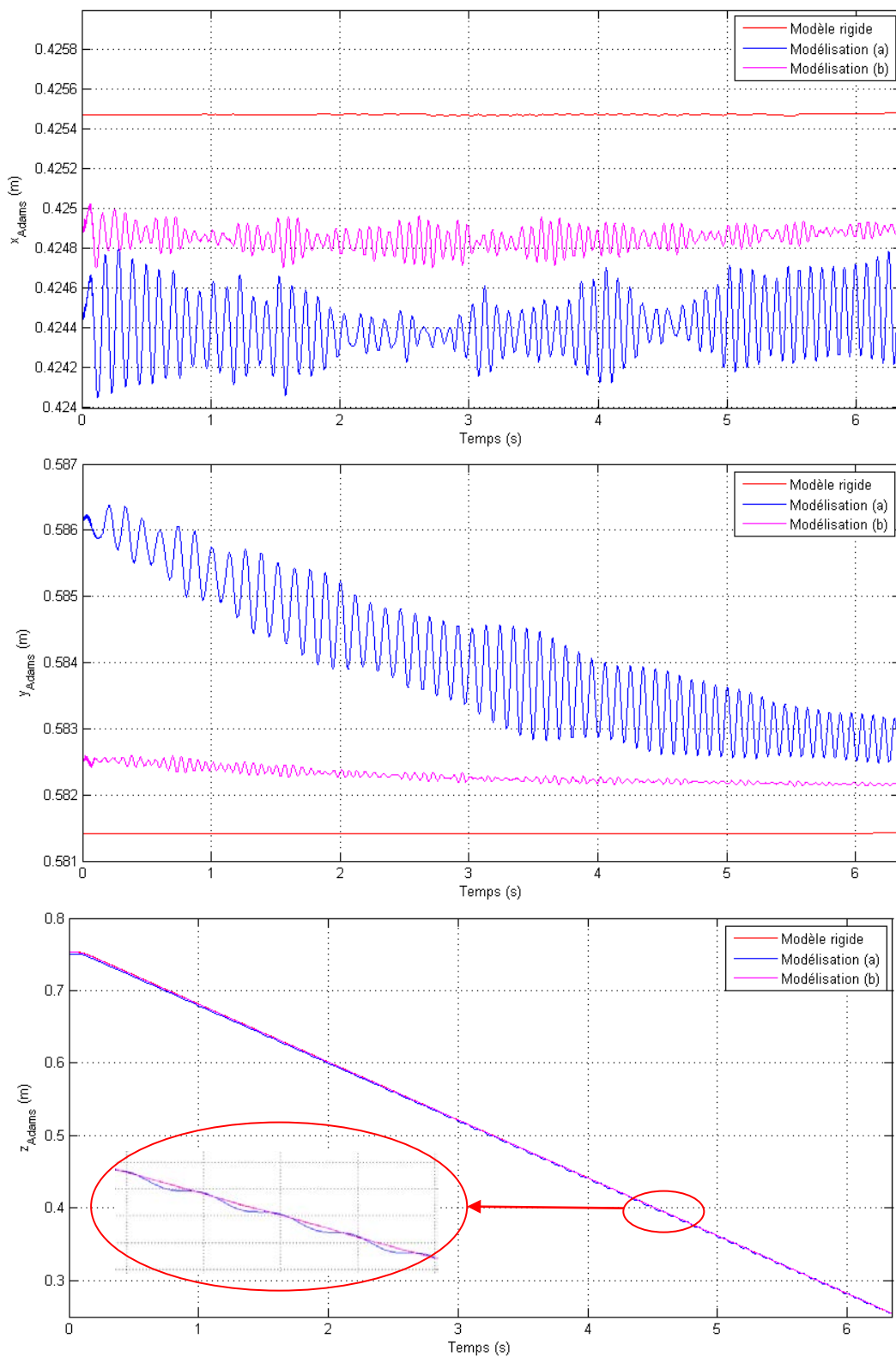


FIG. 9 – Trajectoire de l'effecteur suivant x, y et z du repère Adams avec meulage