



Sujet de thèse

École doctorale EEA de Lyon

Établissement d'inscription : INSA Lyon

École doctorale : ED 160 EEA de Lyon dirigée par Philippe Delachartre

Intitulé du doctorat : Automatique

Sujet de la thèse : Contribution à la conception et à la commande d'interfaces haptiques macro-minis

Unité de recherche : Ampère, dirigée par M. Christian Vollaire

Directeur de thèse : M. Minh Tu Pham

Co-encadrants : M. Richard Moreau / M. Benjamin Delbos

Contexte :

En complément de l'apprentissage traditionnel, qui se fait par compagnonnage en salle d'opération, les simulateurs chirurgicaux ont pour vocation d'améliorer l'apprentissage du geste chirurgical en offrant aux novices un environnement d'apprentissage sûr et maîtrisé.

Dans ce contexte, le laboratoire Ampère s'intéresse depuis plusieurs années à la conception et à la commande de simulateurs haptiques pour l'apprentissage du geste, dont l'objectif est de reproduire les sensations ressenties lors d'un acte médical et nécessaires à son apprentissage par des novices. Ces simulateurs sont constitués d'une interface haptique, un système mécatronique commandé de façon à reproduire fidèlement les sensations de contact issues de l'interaction entre un outil chirurgical, manipulé par le chirurgien, et des tissus biologiques virtuels.

Les travaux récents du laboratoire Ampère se sont notamment intéressés à l'apprentissage de l'acte d'insertion d'aiguille dans différents contextes médicaux [1,2,3]. Les problématiques scientifiques abordées concernent d'une part, la conception du simulateur

dans son ensemble, comprenant les éléments physiques et virtuels nécessaires à l'apprentissage du geste et d'autre part, la modélisation de l'interaction entre l'aiguille et les tissus mous biologiques.

Ces travaux reposent sur des interfaces haptiques commerciales qui ne sont pas adaptées en termes de performances (espaces de travail, capacité et résolution en effort, etc) à un objectif d'apprentissage médical.

Cherchant à palier ces limitations, le présent sujet de thèse vise à développer un cadre méthodologique pour la conception conjointe (par la suite co-conception) de systèmes haptiques macro-minis et de leur commande, à des fins d'apprentissage médical.

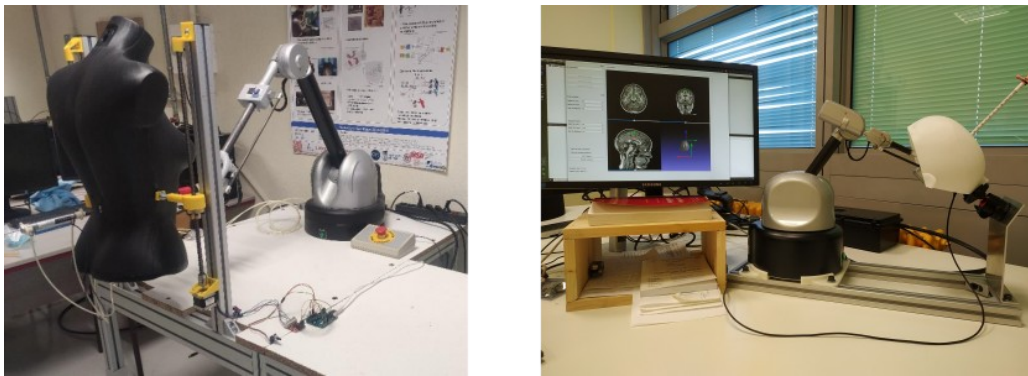


Figure 1: Travaux récents du laboratoire Ampère : simulateurs pour l'apprentissage de l'anesthésie péridurale (à gauche) et de la ponction ventriculaire (à droite)

Domaine et contexte scientifiques :

La simulation haptique consiste à reproduire les sensations de toucher dans un environnement virtuel et a de nombreuses applications aujourd'hui.

Idéalement, une interface haptique devrait être totalement transparente, de sorte que les forces ressenties par l'utilisateur soient déterminées uniquement par l'environnement virtuel [4] et ne soient pas perturbées par l'inertie et les frottements de l'interface. Cet idéal nécessite une interface haptique ne présentant aucune masse ni aucun effet dissipatif, ce qui est irréalisable en pratique [5]. Afin d'approcher cet idéal de performance, les interfaces haptiques devraient jouir d'un grand espace de travail, d'une rigidité élevée ainsi que d'une inertie et de frottements faibles. Ces caractéristiques sont évidemment contradictoires, rendant complexes la conception de ces interfaces. Une solution potentielle que nous souhaitons explorer est donc de concevoir des interfaces haptiques reposant sur une structure mécanique macro-mini.

Les systèmes macro-mini sont composés de deux sous-systèmes connectés en série qui se distinguent par leur propriétés dynamiques. La partie « macro » se caractérise par des

mouvements grossiers dans un (relativement) grand espace de travail. La partie « mini » se caractérise par une bande passante élevée dans un espace de travail réduit autorisant ainsi des mouvements rapides et précis. Ces systèmes sont donc sur-actionnés et se distinguent par les caractéristiques statiques et dynamiques complémentaires des deux étages, permettant d'améliorer considérablement les performances du robot. Notamment, ces systèmes ont prouvé leur intérêt dans différents domaines de la robotique qui nécessitent une maîtrise fine de la position ou des efforts du robot : robotique industrielle [6,6b], robotique médicale [7] et d'Interfaces Humain Machine (IHM) [8].

Ces systèmes n'ont pas fait l'objet d'études approfondies dans le domaine haptique. Pourtant, au même titre que dans les autres domaines d'application, ces systèmes macro-minis ont le potentiel de répondre au cahier des charges exigeant et contradictoire des interfaces haptiques : une grande capacité en effort dans un grand espace de travail, une inertie faible, une bande passante élevée.

Au-delà des propriétés intrinsèques liées à leur structure, la redondance cinématique inhérente aux systèmes macro-minis offre la possibilité d'améliorer les performances de l'interface haptique via la commande, grâce aux degrés de libertés surnuméraires. Cette approche a été explorée pour améliorer la résolution en effort d'une interface haptique faiblement sur-actionnée [9,10], mais n'a pas fait l'objet d'étude dans le cas d'un système largement sur-actionné ou macro-mini.

Les systèmes macro-minis présentent donc des avantages intrinsèques (liés à leur structure) et extrinsèques (liés à leur commande). Exploiter pleinement ces avantages nécessite une co-conception intégrant à la fois synthèse de structure mécanique et stratégie de commande.

Objectif :

L'objectif de cette thèse est de développer une méthodologie de co-conception d'interfaces haptiques macro-mini dans le cadre de la simulation haptique pour l'apprentissage du geste technique (interaction complexe entre un utilisateur et un environnement au moyen d'un outil). Les travaux menés devront permettre de :

(1) Définir les caractéristiques et critères de performance des systèmes haptiques macro-minis

(2) Repositionner ces systèmes dans le cadre de l'étude théorique de la redondance d'entrée développée au laboratoire Ampère [11,12].

(3) Proposer une approche de co-conception des systèmes haptiques macro-minis et de leur commande liée au cahier des charges de l'apprentissage du geste technique.

Verrous scientifiques :

Dans ce contexte, la thèse devra apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- *Comment appréhender de manière générique les interfaces haptiques macro-minis ?*

Ces systèmes n'existant pas à l'heure actuelle, il n'existe pas de cadre permettant la conception, la commande, l'évaluation et la comparaison de leurs performances de façon systématique.

- *Comment déterminer les éléments de conception et de commande de ces systèmes en lien avec un cahier des charges de simulation haptique ?*

Les systèmes macro-minis ont été étudiés dans la littérature et des applications ont vu le jour dans des domaines variés. Les applications haptiques cherchant, au cours d'une interaction avec un utilisateur, à reproduire les propriétés physiques d'un environnement virtuel se démarquent cependant d'une problématique classique de positionnement dans un espace de travail. La thèse pourra donc s'appuyer sur les travaux présents dans la littérature en veillant à les adapter pour des applications haptiques d'apprentissage du geste.

Pour ce faire, des critères devront être établis pour faciliter la synthèse d'interfaces (choix de structure, nombre de degrés de liberté redondants, capacité en effort et bande passante de chaque sous-système) ainsi que de conception des lois de commande associées (choix d'objectifs secondaires de commande).

- *Comment prendre en compte au mieux et de façon systématique les spécificités d'un geste technique et l'interaction avec l'utilisateur dans la conception et la commande de telles interfaces ?*

Dans une démarche classique de mise en service d'une interface haptique, la conception est d'abord réalisée en lien avec un cahier des charges spécifiant dans les grandes lignes les performances devant être atteintes par l'interface (ex : espace de travail, capacité en effort), sans tenir compte de sa commande.

Dans le cas d'une interface macro-mini, les étapes de conception et de commande sont à penser ensemble et sont fortement liées au cahier des charges et à l'étude du geste. Toutes ces dimensions sont fortement interconnectées et devront être traitées de façon simultanée ajoutant encore à la complexité de ces verrous scientifiques.

Contributions originales attendues :

A l'heure actuelle, la co-conception (commande et conception) d'interfaces haptiques macro-mini n'a pas fait l'objet d'étude. La thèse développera une démarche rigoureuse sur

ce thème en liant le cadre théorique de la redondance d'entrée développé au sein du laboratoire aux problématiques de la simulation haptique.

L'une des approches envisageables sera l'exploitation de l'allocation de commande au plus tôt dans la démarche de conception. Le prototype conçu, fabriqué ainsi que les lois de commande proposées au cours de la thèse fourniront une preuve de concept et un support d'échange avec des utilisateurs potentiels de ces technologies.

Partenariat extérieur:

Les partenaires médicaux du laboratoire (HCL, INSERM) ainsi que les différents acteurs lyonnais de la simulation médicale (SimuLyon) seront sollicités dans les phases de rédaction du cahier des charges et de validation d'un prototype.

Programme de recherche et démarche scientifique proposée :

Année 1 :

- Etat de l'art et bibliographie :
 - sur les systèmes haptiques et l'apprentissage du geste
 - sur les systèmes macro-minis
 - sur la redondance d'entrée et l'allocation de commande
- Définir le cahier des charges de l'interface et le banc de test expérimental en lien avec les autres projets de la thématique robotique du laboratoire.

Année 2 :

- Concevoir et fabriquer un prototype de système haptique macro-mini pour une tâche médicale donnée qui sera judicieusement choisie.
- Proposer et implémenter des lois de commande susceptibles d'améliorer le réalisme de la simulation haptique

Année 3 :

- Organiser des essais avec utilisateurs dans le but de comparer les performances de différentes lois de commande.
- Rédiger le rapport de thèse et préparer la soutenance.

Au cours de sa thèse le/la doctorant.e aura accès aux ressources de la plateforme technique FPRoMME (Fluid Power, Robotique Médicale et Multi-Energie) du laboratoire Ampère, les connaissances, les contacts industriels et l'expertise en robotique médicale de la thématique RoSyMe (Robotique et Systèmes Multi énergie) d'Ampère.

Notamment, la thèse pourra s'appuyer sur les infrastructures et matériels du plateau technique (capteurs de forces, Robot Panda de Franka-Emika, ...) et profiter d'autres thèses et projet en cours dans la définition d'un cas d'étude.

Pendant ces trois années, le doctorant devra rédiger des articles scientifiques faisant état de son avancement en vue de publications dans des conférences internationales (ICRA, IROS, EMBC) et dans des revues scientifiques (IEEE TRMB, IEEE TBME, IEEE ToH).

Mots-clefs :

Robotique médicale, simulation pour l'apprentissage du geste, modélisation biomédicale pour la commande, conception mécanique, commande haptique.

Profil recherché :

- Étudiant.e ayant un Master 2 ou un diplôme d'ingénieur, spécialisé.e en mécanique et mécatronique ;
- Intérêt marqué pour les interfaces pluridisciplinaires entre mécanique, automatique et informatique industrielle ;
- Autonomie, rigueur expérimentale et esprit critique appréciés ;
- Des connaissances en simulation numérique, fabrication additive, instrumentation, *Matlab-Simulink* seront un plus

Les candidat.e.s devront manifester un fort intérêt pour la recherche expérimentale à l'interface de plusieurs disciplines, ainsi que d'autonomie et de rigueur scientifique dans la réalisation des expériences.

Financement de la thèse : Contrat doctoral de l'INSA Lyon et possibilité d'enseigner à l'INSA de Lyon.

Encadrement :

- Benjamin Delbos <benjamin.delbos@insa-lyon.fr>
- Minh Tu Pham <minh-tu.pham@insa-lyon.fr>

Objectifs de valorisation des travaux de recherche :

Pendant ces trois années, le doctorant devra rédiger des articles scientifiques faisant état de son avancement en vue de publications dans des conférences internationales (ICRA, IROS, EMBC) et dans des revues scientifiques (IEEE TRMB, IEEE TBME, IEEE ToH).

Par ailleurs la réalisation d'un prototype favorisera les échanges avec les partenaires médicaux du laboratoire (HCL) ainsi que les différents acteurs lyonnais de la simulation médicale (SimuLyon).

Compétences qui seront développées au cours du doctorat :

Robotique, haptique, mécanique, rendu 3D temps réel synchronisé, commande avancée, modélisation biomécanique, informatique temps-réel, méthodes de travail liées à tout travail de recherche (recherche bibliographique, simulation, expérimentation, rédaction d'articles scientifiques, ...).

Perspectives professionnelles après le doctorat :

Carrière:

- dans le domaine académique (post-doc puis poste de chercheur ou enseignant-chercheur) ;
- dans le secteur industriel dans un service de R&D.

Début : 1^{er} octobre 2026

Lieu :

Laboratoire Ampère (Unité Mixte de Recherche du CNRS - UMR 5005)

Equipe AIS – Thématique RoSyMe

INSA Lyon, campus de la Doua

25 avenue Capelle Ouest – Bâtiment St Exupéry

<http://www.ampere-lab.fr>

Références :

- [1] M. Alamilla, C. Barnouin, R. Moreau, F. Zara, F. Jaillet, et al. [A VR and haptic simulator for ultrasound-guided needle insertion](#). IEEE Trans. on Medical Robotics and Bionics, 2022.
- [2] T. Senac, A. Lelevé, R. Moreau, et al.. [Simulating a Syringe Behaviour Using a Pneumatic Cylinder Haptic Interface](#). Control Engineering Practice, 90, pp.231-240, 2019.
- [3] B. Delbos, R. Chalard, A. Lelevé, R. Moreau. [A generalized tracking wall approach to the haptic simulation of tip forces during needle insertion](#). IEEE Trans. on Haptics (ToH), pp.1-14, 2024.
- [4] V. Hayward and K. E. Maclean, "Do it yourself haptics: part I" IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 14, no. 4, p.88-104, dec 2007
- [5] V. Hayward and O. R. Astley, "Performance Measures for Haptic Interfaces," in *Robotics Research*, G. Giralt and G. Hirzinger, Eds., London: Springer London, 1996, pp. 195-206. doi: [10.1007/978-1-4471-1021-7_22](#).
- [6] J. Li et al., "A High-Bandwidth End-Effector With Active Force Control for Robotic Polishing," doi:[10.1109/ACCESS.2020.3022930](#).
- [6b] Mohammad AEK, Hong J and Wang D. Design of a force-controlled end-effector with low-inertia effect for robotic polishing using macro-mini robot approach. Robot Comput Integr Manuf 2018; 49: 54-65.
- [7] Jae-Hun So, Brahim Tamadazte, Jerome Szewczyk. Micro/Macro-Scale Robotic Approach for Middle Ear Surgery. IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics, 2020
- [8] T.-S. Nguyen and C. Gosselin, "A task-level approach for the position control of macro-mini robotic systems," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, p. 09596518251324684, Mar. 2025, doi: [10.1177/09596518251324684](#).
- [9] A. Torabi, M. Khadem, K. Zareinia, G. R. Sutherland, and M. Tavakoli, "Application of a Redundant Haptic Interface in Enhancing Soft-Tissue Stiffness Discrimination," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 4, no. 2, pp. 1037-1044, Apr. 2019, doi: [10.1109/LRA.2019.2893606](#).
- [10] A. Torabi, K. Zareinia, G. R. Sutherland, and M. Tavakoli, "Redundant Haptic Interfaces for Enhanced Force Feedback Capability Despite Joint Torque Limits," in *2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Boston, MA, USA: IEEE, July 2020, pp. 322-328. doi: [10.1109/AIM43001.2020.9158995](#).
- [11] Jean-Francois Trégouët, Jérémie Kreiss, Input redundancy under input and state constraints, *Automatica*, Volume 159, 2024, 111344, ISSN 0005-1098, doi:[10.1016/j.automatica.2023.111344](#).
- [12] Jérémie Kreiss, Jean-François Trégouët, Input redundancy: Definitions, taxonomy, characterizations and application to over-actuated systems, *Systems & Control Letters*, Volume 158, 2021, 105060, ISSN 0167-6911, doi:[10.1016/j.sysconle.2021.105060](#).