



Thèse de doctorat

Établissement d'inscription : INSA Lyon
École doctorale : ED 160 EEA de Lyon dirigée par Philippe Delachartre
Intitulé du doctorat : Automatique
Sujet de la thèse : Développement d'un simulateur haptique d'anesthésie dentaire
Unité de recherche : Ampère, dirigée par M. Christian Voltaire
Directeur de thèse : M. Arnaud Lelevé
Co-encadrants : M. Richard Moreau / M. Benjamin Delbos

Contexte :

La simulation joue un rôle crucial dans la formation médicale, allant de simples maquettes à des environnements avancés de réalité virtuelle. Cependant, des défis persistent, notamment dans l'apprentissage de procédures techniques complexes réalisées "à l'aveugle", sans visualisation directe de la zone de traitement. Pour ces procédures, le "premier contact avec le patient" reste problématique, entraînant des taux d'échec élevés et un stress significatif pour les étudiants. Une approche courante consiste à améliorer la technologie, en proposant un rendu au plus proche de la réalité pendant la formation par simulation [1-2].

Le projet ANR IDEAL (*Improved learning environment for dental anaesthesia*), impliquant les laboratoires [Ampère](#), [Icube](#), [LaRAC](#) et [LIRIS](#), les [Hôpitaux Civils de Lyon \(HCL\)](#), ainsi que l'entreprise [HRV](#), vise à concevoir un simulateur haptique pour l'apprentissage du geste de l'anesthésie du nerf alvéolaire inférieur (NAI) [3, 4, 5]. Cette procédure complexe implique l'insertion d'une aiguille près de la zone du foramen mandibulaire, sans aucune visualisation de l'anatomie interne. Elle présente un taux d'échec élevé, variant entre 7 % et 75 % chez les praticiens novices. Selon [6], ce faible taux de succès est dû, d'une part, à la complexité

technique de la procédure, qui nécessite une connaissance anatomique approfondie, une orientation spatiale précise et un effort mental significatif en raison de la visibilité limitée, et, d'autre part, au stress ressenti par les étudiants lors de leurs premières injections.

Dans ce cadre, cette thèse portera, d'une part, sur la conception et la réalisation d'une partie physique de la mâchoire d'un patient et, d'autre part, sur la réalisation d'un actionneur capable de reproduire les forces mises en jeu lors de l'insertion de l'aiguille montée sur une seringue permettant de délivrer l'anesthésiant. La mâchoire devra être au plus proche de la réalité en terme de mobilité et de rigidité afin de retrouver les contraintes rencontrées pendant l'opération. L'actionneur sera à dimensionner et devra reproduire les sensations ressenties par l'anesthésiste lors de l'insertion dans les tissus mous. En fonction de la position de l'aiguille, un modèle numérique reproduira le comportement des tissus traversés pour commander l'actionneur afin de reproduire les efforts lors de l'insertion.

Domaine et contexte scientifiques :

Concernant le rendu haptique des objets déformables requis pour le simulateur proposé, malgré des recherches approfondies sur l'insertion d'aiguille [7-10], plusieurs défis demeurent. Ceux-ci incluent la modélisation précise de la déformation et du comportement des tissus lors de l'insertion, la détection de contacts mous et rigides, et l'assurance de réponses de contact réalistes. De plus, effectuer ces simulations en temps interactif pour le contrôle des dispositifs haptiques nécessite une puissance de calcul significative [11]. Les solutions actuelles, y compris celles développées par le laboratoire Ampère [10, 12, 13], s'appuient sur des dispositifs haptiques standards fondés sur des bras robotiques. Cependant, ces systèmes présentent des limitations, telles qu'un espace de travail inadapté, une rigidité accrue et de l'inertie, qui peuvent interférer avec le mouvement naturel et entraver l'apprentissage. Dans le projet IDEAL, l'outil haptique devra être entièrement portable. La seule source potentielle de perturbation acceptable pour les apprenants sera les câbles nécessaires par l'apport d'énergie, mais il faudra les rendre aussi légers et flexibles que possible pour minimiser leur impact. Si la source d'énergie est éloignée, son éventuel retard de transmission devra être pris en compte. Le retard proviendra également du modèle numérique qui sera sollicité pour estimer les forces mises en jeu lors de l'interaction de l'outil avec les tissus. Ce modèle numérique sera à développer à partir des travaux des partenaires du projet qui développeront un modèle numérique plus complexe. Le modèle

proposé devra être capable de communiquer avec la partie haptique en respectant les contraintes de temps de calcul qui doit être de l'ordre du kHz.

Objectif :

L'objectif de ce travail de doctorat est donc la proposition d'un simulateur physique de patient qui permettra aux apprenants de palper le patient et d'interagir avec celui-ci de manière à simuler l'interaction praticien-patient. Il sera accompagné du développement d'un dispositif haptique pour gérer l'interaction praticien-outil. Ce dispositif haptique dédié utilisera un actionnement permettant de reproduire différents types de contacts (durs et mous), ainsi que de méthodes pour reproduire les forces impliquées dans le geste. Un défi clé est de gérer les interactions avec des matériaux de rigidité variable, allant du tendre (chair) au très rigide (os), tout en concevant un outil haptique portable réaliste qui imite les véritables instruments opérationnels sans les contraintes d'un bras haptique traditionnel.

Verrous scientifiques :

Ce projet permettra de lever les verrous scientifiques suivants :

- simulation haptique pédagogique mixant tangible et numérique
- reproduction des efforts par un dispositif haptique actif sans support
- commande en raideur d'actionneurs
- interaction avec un modèle numérique

Contributions originales attendues :

A l'heure actuelle, aucun simulateur n'existe pour assister ce geste quotidien pourtant loin d'être simple et anodin. Ce simulateur aidera à améliorer ce geste technique et à former les étudiants sans danger pour les patients. La partie mécatronique du simulateur est au centre de ce projet. Les autres équipes apporteront leurs compétences en terme de modélisation biomécanique et simulation numérique temps réel, ainsi que sur les aspects d'analyse du geste et de didactique. Le simulateur sera donc conçu de manière globale en prenant en compte les contraintes de chaque partie lors de son développement.

Programme de recherche et démarche scientifique proposée :

L'année 1 débutera par l'étude et la réalisation de la partie tangible du simulateur afin d'assurer une palpation réaliste. Une étude de l'état de l'art permettra de s'appuyer sur les travaux récents de la communauté dans ce domaine. Cette étude se fondera sur les données du LARAC, qui aura formalisé en amont les besoins pédagogiques de cet apprentissage.

Cette première année se terminera par une proposition de dispositif haptique actif pour simuler l'insertion de l'aiguille et le mouvement du piston de la seringue associée. Des simulations à la fois mécaniques et d'automatique devront valider la capacité de la solution à restituer les efforts à fournir avec la précision nécessaire.

L'année 2 consistera à prototyper la « seringue haptique » afin d'étudier des lois de commande susceptibles de reproduire les sensations kinesthésiques ressenties par le praticien en temps normal et dans les cas anormaux. Cette problématique n'a été étudiée qu'en partie, lors de la conception d'un simulateur d'insertions péridurales [12] et en utilisant une interface haptique du commerce sur support. Des expérimentations itératives seront nécessaires avec d'abord un chirurgien-dentiste expert, puis plusieurs, pour assurer une bonne fidélité du simulateur. Dans ce processus, les ressources à disposition du doctorant seront la plateforme FPRoMME 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. Le modèle numérique de simulation biomécanique sera développé en partie par les partenaires LIRIS et ICube.

Pendant l'année 3 seront évalués les capacités du simulateur à former efficacement les apprenants à ce geste précis, en collaboration avec le LARAC. Une campagne de mesure sera également mise en place avec des experts et des novices afin de quantifier la différence entre ces deux populations en vue d'évaluer l'apprentissage sur ce simulateur. La fin de cette année sera également consacrée à la rédaction du rapport de thèse et à la préparation de la soutenance.

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>
- Richard Moreau <richard.moreau@insa-lyon.fr>
- Arnaud Lelevé <arnaud.leleve@insa-lyon.fr>

Objectifs de valorisation des travaux de recherche :

Le partenariat avec les HCL motive l'intérêt de ce simulateur pour la formation de son personnel et plus généralement des chirurgiens-dentistes.

La réalisation et la validation d'un prototype testé sur le terrain (niveau TRL 4-5) ouvrira la voie à une valorisation industrielle par le partenaire HRV.

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 : septembre/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>

Partenariat extérieur:

Un lien fort avec les partenaires du projet sera à entretenir, à la fois côté médical (HCL) et industriel (HRV) afin d'assurer la faisabilité et la qualité de la solution.



Ecole Centrale de Lyon - INSA de Lyon – Université Claude Bernard Lyon 1

Laboratoire Ampère

Unité Mixte de Recherche du CNRS - UMR 5005

Génie Electrique, Automatique, Bioingénierie
36 avenue Guy de Collongue – Bâtiment H9 - 69134 Ecully Cedex – France
Tél : 04 72 18 60 99 http://www.ampere-lab.fr Fax 04 78 43 37 17

PhD

Establishment : INSA Lyon

Doctoral School : ED 160 EEA Lyon directed by Pr. Philippe Delachartre

Discipline : Automatic control

Topic : Development of a haptic simulator for dental anesthesia.

Research lab : Ampere, directed by Pr. Christian Voltaire

PhD Supervisor : Pr. Arnaud Lelevé

Co-supervisors: Dr. Richard Moreau and Dr. Benjamin Delbos

Context:

Simulation plays a crucial role in medical training, ranging from simple models to advanced virtual reality environments. However, challenges remain, particularly in learning complex technical procedures performed "blindly," without direct visualization of the treatment area. For these procedures, the "first contact with the patient" remains problematic, leading to high failure rates and significant stress for students. A common approach is to enhance technology, providing a realistic rendering during simulation training.

The ANR IDEAL project (Improved Learning Environment for Dental Anesthesia), involving the [Ampère](#), [Icube](#), [LaRAC](#), and [LIRIS](#) laboratories, the [Civil Hospitals of Lyon](#) (HCL), as well as the company [HRV](#), aims to design a haptic simulator for learning the procedure of inferior alveolar nerve (IAN) anesthesia. This complex procedure involves the insertion of a needle near the area of the mandibular foramen, without any visualization of the internal anatomy. It has a high failure rate, ranging between 7% and 75% among novice practitioners. According to research, this low success rate is attributed, on one hand, to the technical complexity of the procedure, which requires in-depth anatomical knowledge,

precise spatial orientation, and significant mental effort due to limited visibility, and on the other hand, to the stress felt by students during their first injections.

In this context, this thesis will focus on, firstly, the design and implementation of a physical model of a patient's jaw, and secondly, the development of an actuator capable of reproducing the forces involved during the insertion of the needle mounted on a syringe delivering anesthetic. The jaw must closely resemble reality in terms of mobility and rigidity to reflect the constraints encountered during the operation. The actuator will need to be appropriately sized and must replicate the sensations experienced by the anesthetist during insertion into the soft tissues. Depending on the position of the needle, a digital model will simulate the behavior of the tissues traversed to control the actuator, reproducing the forces during insertion.

Scientific Domain and Context:

Regarding the haptic rendering of deformable objects required for the proposed simulator, despite extensive research on needle insertion, several challenges remain. These include the accurate modeling of tissue deformation and behavior during insertion, detection of soft and rigid contacts, and ensuring realistic contact responses. Furthermore, running these simulations in real-time for controlling haptic devices requires significant computational power. Current solutions, including those developed by the Ampère laboratory, rely on standard haptic devices based on robotic arms. However, these systems have limitations, such as an unsuitable workspace, increased rigidity, and inertia, which can interfere with natural movement and hinder learning. In the IDEAL project, the haptic tool must be fully portable. The only potential source of acceptable disruption for learners will be the cables necessary for power supply, but these should be made as light and flexible as possible to minimize their impact. If the power source is distant, any transmission delay must be taken into account. Delays will also arise from the digital model that will be used to estimate the forces involved during the tool's interaction with the tissues. This digital model will be developed based on the work of project partners who will create a more complex numerical model. The proposed model must be capable of communicating with the haptic component while adhering to computation time constraints, which should be in the order of kilohertz.

Objective:

The aim of this doctoral work is to propose a physical patient simulator that will allow learners to palpate the patient and interact with them in a way that

simulates practitioner-patient interaction. This will be accompanied by the development of a haptic device to manage the practitioner-tool interaction. This dedicated haptic device will utilize actuators to reproduce different types of contacts (hard and soft), as well as methods to replicate the forces involved in the gesture. A key challenge is to manage interactions with materials of varying stiffness, ranging from soft (flesh) to very rigid (bone), while designing a realistic portable haptic tool that mimics actual operational instruments without the constraints of a traditional haptic arm.

Scientific Challenges:

This project will address the following scientific challenges:

- Haptic simulation that combines tangible and digital elements
- Reproduction of forces using an active haptic device without support
- Stiffness control of actuators
- Interaction with a digital model

Expected Original Contributions:

Currently, no simulator exists to assist with this everyday gesture, which is far from simple and trivial. This simulator will help improve this technical gesture and train students safely, without risk to patients. The mechatronic component of the simulator is central to this project. Other teams will contribute their expertise in biomechanical modeling and real-time numerical simulation, as well as in gesture analysis and pedagogy. The simulator will be designed holistically, taking into account the constraints of each component during its development.

Proposed Research Program and Scientific Approach:

Year 1 will begin with the study and realization of the tangible part of the simulator to ensure realistic palpation. A state-of-the-art review will draw on recent work from the community in this field. This study will be based on data from LARAC, which will have formalized the educational needs of this training in advance.

This first year will conclude with a proposal for an active haptic device to simulate the insertion of the needle and the movement of the associated syringe piston. Both mechanical and automatic simulations will need to validate the solution's capability to reproduce the necessary forces with the required precision.

Year 2 will involve prototyping the "haptic syringe" to study control laws likely to reproduce the kinesthetic sensations experienced by the practitioner under normal and abnormal conditions. This issue has only been partially studied during the design of a simulator for epidural insertions, using a commercial haptic interface with support. Iterative experimentation will be necessary, first with an expert dentist and then with several, to ensure good simulator fidelity. During this process, the doctoral candidate will have access to the FPRoMME platform from the Ampère laboratory, along with knowledge, industrial contacts, and expertise in medical robotics from the RoSyMe (Robotics and Multi-Energy Systems) theme of Ampère. The numerical model for biomechanical simulation will be developed in part by the LIRIS and ICube partners.

In Year 3, the simulator's ability to effectively train learners in this precise gesture will be evaluated in collaboration with LARAC. A measurement campaign will also be established with experts and novices to quantify the differences between these two populations in order to assess learning on this simulator. The end of this year will also be dedicated to writing the thesis report and preparing for the defense.

During these three years, the doctoral candidate will need to write scientific articles to report on their progress for publication in international conferences (ICRA, IROS, EMBC) and scientific journals (IEEE TRMB, IEEE TBME, IEEE ToH).

Keywords: Medical robotics, simulation for gesture learning, biomedical modeling for control, mechanical design, haptic control.

Desired Profile:

- Student with a Master's degree or engineering diploma, specialized in mechanics and mechatronics;
- Strong interest in interdisciplinary interfaces between mechanics, automation, and industrial computing;
- Appreciated qualities include autonomy, experimental rigor, and critical thinking;
- Knowledge in numerical simulation, additive manufacturing, instrumentation, and MATLAB-Simulink will be a plus.

Candidates should demonstrate a strong interest in experimental research at the intersection of multiple disciplines, as well as autonomy and scientific rigor in conducting experiments.

Funding for the PhD:

Doctoral contract from INSA Lyon and the possibility of teaching at INSA Lyon.

Supervision:

- Benjamin Delbos <benjamin.delbos@insa-lyon.fr>
- Richard Moreau <richard.moreau@insa-lyon.fr>
- Arnaud Lelevé <arnaud.leleve@insa-lyon.fr>

Objectives for Valuating Research Work:

The partnership with HCL highlights the interest in this simulator for training its staff and, more generally, dentists.

The realization and validation of a field-tested prototype (TRL level 4-5) will pave the way for industrial valuation by the partner HRV.

Skills to be Developed During the PhD:

Robotics, haptics, mechanics, synchronized real-time 3D rendering, advanced control, biomechanical modeling, real-time computing, and research-related working methods (literature research, simulation, experimentation, scientific article writing, etc.).

Professional Prospects After the PhD:

Career opportunities include:

- In the academic field (post-doc followed by a researcher or teaching-research position);
- In the industrial sector within a R&D department.

Start Date:

September or October 1, 2026

Location:

Ampère Laboratory (Mixed Research Unit of CNRS - UMR 5005)

AIS Team – RoSyMe Theme

INSA Lyon, Doua Campus

25 Avenue Capelle Ouest – St Exupéry Building

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

External Partnership:

A strong link with project partners will need to be maintained, both on the medical side (HCL) and the industrial side (HRV) to ensure the feasibility and quality of the solution.

Références :

- [1] Xie et al. [A Review on VR Skill Training Applications](#). Front. VR., Sec. Technologies for VR, 2021.
- [2] A. Grottke, et al. [VR-based simulator for training in regional anaesthesia](#), British Journal of Anaesthesia, 103(4), 2009.
- [3] R. Mladenovic, et al. [Effectiveness of Augmented Reality Mobile Simulator in Teaching Local Anesthesia of Inferior Alveolar Nerve Block](#). J Dent Educ. 83(4), 2019.
- [4] Garcia-Blanco M, Ruffini JM, Salomone L, Gualtieri AF, Puia SA. [Student training in administering inferior alveolar nerve block anesthesia with a simple manufactured simulation model](#). J Dent Educ. 88(7), 2024.
- [5] E. Lövquist, et al. A. [Virtual reality-based medical training and assessment: The multidisciplinary relationship between clinicians, educators and developers](#). Med Teach, 34(1), 2012.
- [6] F. Yusifli, BK. Işik. [Evaluating the difference in perception of the Akinosi technique among dentistry students: A comparison between theoretical and practical learning](#). J Dent Educ, 2024.
- [7] N. Abolhassani, et al. [Needle insertion into soft tissue: A survey](#). Medical Engineering & Physics 29, 2007.
- [8] C.G. Corrêa, et al. [Haptic interaction for needle insertion training in medical applications: The state-of-the-art](#). Medical Engineering and Physics 6, 2019.
- [9] B. Delbos, R. Chalard, R. Moreau, M. T. Pham, A. Lelevé. [Review on Needle Insertion Haptic Simulation](#). Current Robotics Reports, Medical and Surgical Robotics, 2022.
- [10] 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.
- [11] Z. Zeng, S. Cotin, H. Courtecuisse. [Real Time FE Simulation for Large Scale Problems Using Precondition Based Contact Resolution and Isolated DOFs Constraints](#). Computer Graphics Forum, 41(6), 2022.
- [12] 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.

[13] 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.