

## OFFRE DE THÈSE

MODÉLISATION PAR INTERACTION FLUIDE–STRUCTURE D'UN JUMENTO NUMÉRIQUE  
D'ARTÈRE DIGITALE PROPRE SOUMISE À DES VIBRATIONS SOUS FLUX PULSÉ

*(Volet 1 du projet BIOPULSE — décoder l'impact des vibrations sur la sténose artérielle)*

**Collaboration de recherche :** INRS (Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles), UMPL/FEMTO-ST (Université Marie et Louis Pasteur), UTC/BMBI (Université de Technologie de Compiègne).

**Résumé du sujet :**

*En France, 11 % des salariés utilisent des machines vibrantes tenues ou portées à la main qui menacent pernicieusement leur santé vasculaire. Parce que la réglementation actuelle sous-estime ce danger, l'INRS lance une contre-offensive scientifique avec le projet BIOPULSE. L'enjeu de cette thèse : simuler numériquement l'impact de ces vibrations sur le flux sanguin et sur les contraintes mécaniques dans les parois de nos artères digitales. Une plongée biomécanique inédite au cœur des vaisseaux sanguins pour comprendre l'origine des lésions vasculaires afin de réduire le risque sur la santé des travailleurs.*

## ➔ CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

## ★ CONTEXTE

En France, approximativement 11 % des salariés sont exposés à des vibrations transmises aux membres supérieurs. De nombreux milieux professionnels sont concernés : le bâtiment, les travaux publics, la sylviculture, les fonderies, les ateliers mécaniques, l'agriculture, l'industrie du bois, etc.

Une exposition prolongée à de forts niveaux vibratoires peut conduire à des pathologies d'ordre vasculaire, neurologique, ostéo-articulaire ou musculo-tendineux. Afin de protéger les salariés



contre les pathologies liées aux vibrations mécaniques transmises au membre supérieur, l'exposition vibratoire professionnelle est réglementée. Plusieurs études épidémiologiques, histologiques et physiologiques ont montré que cette dose vibratoire réglementaire sous-estime probablement le risque vibratoire concernant les troubles angioneurotiques.

Ainsi, l'INRS mène, depuis plusieurs années, des travaux de recherche pour mesurer, simuler et mieux comprendre les effets biomécaniques,

mécanobiologiques et physiologiques des vibrations mécaniques transmises au système main-bras et au réseau vasculaire digital. Le but ultime est de prévenir l'apparition du syndrome de Raynaud d'origine vibratoire chez les salariés utilisateurs de machines portées ou tenues à la main et transmettant des vibrations de fréquences supérieures à une cinquantaine de hertz.

C'est dans cette perspective que s'inscrit le projet de recherche BIOPULSE, conduit par l'INRS en partenariat avec plusieurs laboratoires académiques et hospitaliers. Ce projet s'articule autour cinq volets complémentaires dont le but cardinal est de relier l'accélération mesurée sur la machine vibrante à la sténose artérielle induite à long terme par des mécanismes d'hyperplasie intinale. Le présent sujet de thèse correspond au volet 1, qui constitue le socle théorique et numérique de la composante biomécanique du projet BIOPULSE.

## ★ PROBLÉMATIQUE

Nos travaux antérieurs ont montré que la baisse neuronale de la contrainte de cisaillement pariétale (Wall Shear Stress — WSS —), induite par les vibrations sur la main controlatérale non directement exposée aux vibrations, était

indépendante de la fréquence et variait en fonction du logarithme de l'amplitude de l'accélération des vibrations. Une nouvelle dose vibratoire, sous la forme d'une durée quotidienne maximale d'exposition, en a été déduite pour un degré de sténose pathologique de 20 % établi après quinze années d'exposition professionnelle.

Cette dose ne couvre cependant que la main non directement exposée. Or, sur la main qui tient la machine vibrante, les vibrations se propagent dans les tissus jusqu'aux artères digitales propres et interagissent directement avec la paroi vasculaire. Il en résulte une perturbation de l'hémodynamique locale et une modification du champ de contraintes mécaniques dans la paroi artérielle, résultantes d'interactions fluide-structure complexes qui peuvent être étudiées par la modélisation numérique.

La problématique scientifique et la question de recherche que la thèse ambitionne de solutionner peuvent s'énoncer ainsi :

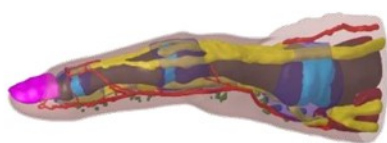
**Comment les caractéristiques physiques d'une vibration mécanique (fréquence, amplitude de l'accélération de la vibration) interagissent-elles avec un écoulement sanguin pulsé au cours des phases systoliques et diastoliques pour modifier la contrainte de cisaillement pariétale et les contraintes circonférentielles dans la couche *media* d'une artère digitale saine ?**

Répondre à cette question suppose de lever plusieurs verrous théoriques, numériques, et expérimentaux : définir une loi de comportement visco-hyperélastique anisotrope de l'artère digitale propre ; construire des modèles de couplage fluide-structure à la fois, adaptés à des sollicitations dynamiques rapides, et robustes, même lorsque les densités du sang et des parois de l'artère sont proches ; et valider expérimentalement les modèles sur des fantômes physiques représentatifs du comportement mécanique de l'artère et de sa géométrie.

## ➔ OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

### ★ OBJECTIFS

L'objectif principal de la thèse est de développer un cadre de modélisation d'interaction fluide-structure minutieux, exigeant, et original pour simuler les comportements mécaniques structurel



et fluide d'une artère digitale propre soumise simultanément

à un écoulement pulsé et à une sollicitation vibratoire représentative de l'exposition professionnelle.

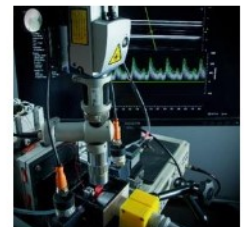
Ces modèles seront, ensuite, ajustés et validés expérimentalement en comparant les résultats des simulations à des mesures effectuées sur des fantômes d'artères en élastomère.

À l'issue de ces validations, un plan d'expérience numérique sera réalisé sur les paramètres des modèles pour comprendre comment les caractéristiques de la vibration, couplées à celles

du comportement mécanique de l'artère et au régime pulsé du sang, modifient le WSS et les contraintes circonférentielles dans la couche *media* de l'artère.

### ★ MÉTHODOLOGIE

Le travail pourrait s'organiser autour de trois axes principaux. Une première étape consisterait à développer des modèles semi-analytiques de vibrations dans des tubes non linéaires — d'abord sans fluide, puis avec fluide confiné, enfin avec fluide en écoulement — afin d'isoler les phénomènes physiques élémentaires et de produire des solutions de référence pour les modèles tridimensionnels ultérieurs.



Le cœur du travail résidera dans la modélisation fluide-structure tridimensionnelle de tubes, puis d'artères seules, et enfin d'artères intégrées dans un doigt, soumis simultanément à un écoulement

physiologique pulsé et à des vibrations mécaniques externes (solveurs partitionné — LS-Dyna — et monolithiques — turtle FSI et FEBio —). Les simulations seront confrontées à des mesures conduites sur des fantômes en élastomère, tubulaires et de géométrie réelle d'artères, soumis à un flux pulsé et à une excitation vibratoire

contrôlée en accélération. Les grandeurs hémodynamiques seront acquises par échographie ultra-haute fréquence (VisualSonics Vevo F2, sonde 71 MHz) et par micro-PIV.

## ➔ PROFIL RECHERCHÉ

**Le(a) candidat(e) sera titulaire d'un diplôme d'ingénieur ou d'un Master 2 recherche en mécanique, biomécanique, modélisation numérique ou discipline apparentée.**

**Compétences techniques :** en mécanique des milieux continus, dynamique des structures, et mécanique des fluides. Une bonne maîtrise en programmation scientifique (Matlab, Python) est demandée, ainsi que la connaissance de la méthode des éléments finis et une expérience d'utilisation d'au moins un solveur.

**Qualités personnelles :** curiosité et rigueur scientifique, esprit d'analyse, autonomie, capacité à travailler en équipe dans un environnement scientifique distribué entre plusieurs partenaires (INRS, UMLP, UTC).

**Bonus :** une connaissance, même initiale, de l'un ou plusieurs des domaines suivants constituera un atout : théorie des coques, comportement hyperélastique et viscoélastique des tissus mous, dynamique des fluides numérique, méthodes de couplage fluide-structure, biomécanique vasculaire.

## ➔ ENCADREMENT ET CONDITIONS DE TRAVAIL

La thèse sera effectuée au sein du laboratoire EVO (Électromagnétisme, Vibrations et Optique) du département IET (Ingénierie des Équipements de Travail) de l'INRS (Vandœuvre-lès-Nancy, 54), avec des missions ponctuelles à l'UMLP (Besançon) et occasionnelles à l'UTC (Compiègne). Le(a) doctorant(e) sera rattaché(e) à l'École Doctorale de Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques (ED SPIM, ED37) de l'UMLP.

**Direction scientifique :** M. Christophe NOËL (INRS — IET / EVO —) et M<sup>me</sup> la Pr Emmanuelle JACQUET (UMLP — Département de Mécanique Appliquée / FEMTO-ST —).

**Co-encadrement :** M<sup>me</sup> Anne-Virginie SALSAC (Directrice de l'UMR UTC/BMBI).

**Durée :** 3 ans, dans le cadre d'un contrat à durée déterminée de l'INRS.

**Rémunération :** 2 725 € brut par mois.

**Démarrage envisagé :** janvier 2027.

## ➔ CANDIDATURE

Adressez votre candidature en envoyant une lettre de motivation, un curriculum vitae détaillé, les relevés de notes des deux dernières années universitaires, et, dans la mesure du possible, deux lettres de recommandation par courriel simultanément aux co-directeurs de thèse :

Christophe NOËL : [christophe.noel@inrs.fr](mailto:christophe.noel@inrs.fr)      Emmanuelle JACQUET : [emmanuelle.jacquet@univ-fcomte.fr](mailto:emmanuelle.jacquet@univ-fcomte.fr)

**Rejoignez un projet de recherche innovant et pluridisciplinaire, à l'interface entre la biomécanique vasculaire et la dynamique des fluides biologiques, avec des applications concrètes pour la santé des travailleurs !**

## ÉLÉMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Noël C, Settembre N, Reda M, Jacquet E. A Multiscale Approach for Predicting Certain Effects of Hand-Transmitted Vibration on Finger Arteries. *Vibration* 2022;5:213–37. <https://doi.org/10.3390/vibration5020014>.
- [2] Noël C, Settembre N. Assessing mechanical vibration-altered wall shear stress in digital arteries. *Journal of Biomechanics* 2022;131:110893. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110893>.
- [3] Noël C, Settembre N. Near-wall hemodynamic parameters of finger arteries altered by hand-transmitted vibration. *Computers in Biology and Medicine* 2024;168:107709. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2023.107709>.
- [4] Reda M, Noël C, Settembre N, Chambert J, Lejeune A, Rolin G, et al. Agent-based model of the vibration-induced intimal hyperplasia. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology* 2022;21:1457–81. <https://doi.org/10.1007/s10237-022-01601-5>.
- [5] Amabili M. *Nonlinear Mechanics of Shells and Plates in Composite, Soft and Biological Materials*. 1st ed. Cambridge University Press; 2018. <https://doi.org/10.1017/9781316422892>.
- [6] Andrini D, Chen X, Ciarletta P. Nonlinear Morphoelastic Theory of Biological Shallow Shells with Initial Stress. *J Elast* 2025;157:21. <https://doi.org/10.1007/s10659-025-10113-z>.
- [7] Soares RM, Aguiar DMO, Silva FMA da. Effects of modal coupling on the nonlinear dynamics of hyperelastic circular cylindrical shells. *Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE) 2024*. <https://doi.org/10.55592/cilamce.v6i06.10255>.
- [8] Saib ZA, Abed F, Ghayesh MH, Amabili M. A review of fluid-structure interaction: blood flow in arteries. *Biomedical Engineering Advances* 2025;9:100171. <https://doi.org/10.1016/j.bea.2025.100171>.
- [9] Bergersen A, Slyngstad A, Gjertsen S, Souche A, Valen-Sendstad K. turtleFSI: A Robust and Monolithic FEniCS-based Fluid-Structure Interaction Solver. *JOSS* 2020;5:2089. <https://doi.org/10.21105/joss.02089>.
- [10] Yamamoto K, Bruneau DA, Ring J, Dokken JS, Valen-Sendstad K. VaSP: Vascular Fluid–Structure Interaction Pipeline. *SoftwareX* 2025;32:102392. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2025.102392>.
- [11] Soliveri L, Poloni S, Brambilla P, Caroli A, Remuzzi A, Bozzetto M, et al. High-Frequency Vessel Wall Vibrations Associate With Stenosis Formation and Arteriovenous Fistula Failure. *Kidney Medicine* 2025;7:100957. <https://doi.org/10.1016/j.xkme.2024.100957>.
- [12] Soliveri L, Poloni S, Brambilla P, Zerbi S, Cabrini G, Caroli A, et al. The Role of High-Frequency Wall Vibrations in Adverse Vascular Remodeling of Arteriovenous Fistula for Hemodialysis. *Kidney360* 2026. <https://doi.org/10.34067/KID.0000001112>.
- [13] Bruneau DA, Steinman DA, Valen-Sendstad K. Understanding intracranial aneurysm sounds via high-fidelity fluid-structure-interaction modelling. *Commun Med* 2023;3:163. <https://doi.org/10.1038/s43856-023-00396-5>.
- [14] Shim JJ, Maas SA, Weiss JA, Ateshian GA. Finite Element Implementation of Biphasic-Fluid Structure Interactions in FEBio. *Journal of Biomechanical Engineering* 2021;143. <https://doi.org/10.1115/1.4050646>.
- [15] Mobadersany N, Meshram NH, Kemper P, Sise CV, Karageorgos GM, Liang P, et al. Pulse wave imaging of a stenotic artery model with plaque constituents of different stiffnesses: Experimental demonstration in phantoms and fluid-structure interaction simulation. *Journal of Biomechanics* 2023;149:111502. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111502>.
- [16] Nisar H, Moore J, Piazza R, Maneas E, Chen ECS, Peters TM. A simple, realistic walled phantom for intravascular and intracardiac applications. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 2020;15:1513–23. <https://doi.org/10.1007/s11548-020-02201-3>.