

Avis de Soutenance

Madame Léonore BORDERE

RECHERCHES BIOMEDICALES Ingénierie biomécanique et biomédicale et thérapeutiques innovantes

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

La simulation numérique comme outil d'évaluation de la planification préopératoire en chirurgie du pied : application à la correction de l'hallux valgus

Travaux dirigés par Monsieur Michel BEHR et Wei WEI

Soutenance prévue le **mardi 19 mai 2026** à 14h00

Lieu : Fac de médecine, secteur Nord 51 Bd Pierre Dramard 13015 Marseille

Salle : des thèses

Composition du jury proposé

M. Wei WEI	Ingénieur de recherche	Aix-Marseille Université, Université Gustave Eiffel, LBA UMR T24	Co-directeur de thèse
M. Jérôme MOLIMARD	Professeur des universités	École des Mines de Saint-Étienne, SAINBIOSE INSERM U1059	Rapporteur
M. Michel BEHR	Directeur de recherche	Aix-Marseille Université, Université Gustave Eiffel, LBA UMR T24	Directeur de thèse
M. Yohan PAYAN	Directeur de recherche	CNRS UMR 5525 TIMC-BIOMÉCA, Université Grenoble Alpes	Rapporteur
Mme Marie-Aude MUNOZ	Chirurgien orthopédiste et traumatologue	Polyclinique Saint-Roch	Examinatrice
M. Philippe ROUCH	Professeur des universités	Arts et métiers, EPF, Institut de biomécanique humaine Georges-Charpak (IBHGC)	Président

Mots-clés : Simulation éléments finis, hallux valgus, patient-spécifique, biomécanique du pied, Planification chirurgicale, recherche translationnelle

Résumé :

La chirurgie orthopédique du pied a fortement évolué au cours des dernières décennies grâce aux innovations technologiques. Pourtant, ses résultats postopératoires demeurent moins homogènes que pour d'autres articulations du membre inférieur. Cette situation s'explique par la complexité

multi-structurelle du pied, par des consensus thérapeutiques encore limités, ainsi que par la difficulté à anticiper les conséquences mécaniques du geste chirurgical. L'hallux valgus illustre ces enjeux : pathologie fréquente, multifactorielle, associée à une grande diversité de procédures opératoires, elle reste marquée par des récurrences, des corrections incomplètes et une satisfaction patient variable. Le paradigme clinique, encore largement fondé sur des observations statiques et une appréciation empirique des couplages mécaniques, apparaît insuffisant pour prédire la fonction postopératoire d'un organe dont le comportement dynamique est central. Dans ce contexte, les modèles éléments finis représentent des outils prometteurs, mais leur usage reste majoritairement associé à la recherche. Malgré la richesse des travaux existants, leur intégration clinique est limitée par des verrous translationnels liés à la génération des modèles, à leur personnalisation à partir de données cliniquement accessibles, et à l'absence de démonstration de leur capacité prédictive postopératoire. Cette thèse propose une preuve de concept de jumeau numérique patient-spécifique du pied hallux valgus, compatible avec la pratique clinique. Le travail combine une étude clinique suivant les patients dans leur parcours de soin, un dispositif d'acquisition utilisable en cabinet, une personnalisation géométrique semi-automatique par morphing, puis une personnalisation biomécanique fondée sur un plan d'expériences numérique en deux chargements : statique et dynamique. Ce jumeau validé est ensuite utilisé pour reproduire numériquement l'opération réalisée et évaluer sa capacité prédictive postopératoire. Les résultats montrent qu'il est possible d'acquérir, en environnement clinique, les données nécessaires à la génération de modèles patient-spécifiques. La personnalisation biomécanique en deux chargements permet de lever une partie de la non-unicité en statique : la validation dynamique départage des configurations indiscernables en appui statique et conduit, pour chaque patient, à un modèle préopératoire cohérent, avec une erreur dynamique globale inférieure à 16 %. La confrontation postopératoire montre ensuite une capacité prédictive moyenne proche de 15 %, en statique comme en dynamique, pour les trois patients. À notre connaissance, ce travail constitue la première démonstration d'une validation prédictive directe d'un modèle éléments finis de pied patient-spécifique en contexte postopératoire. Ces résultats suggèrent qu'il devient possible de faire évoluer ces modèles du seul champ académique vers des outils accessibles en clinique, capables de soutenir des conclusions biomécaniques individualisées.

Summary:

Orthopedic foot surgery has evolved significantly in recent decades thanks to technological innovations. However, its postoperative results remain less consistent than other joints in the lower limb. This situation can be explained by the multi-structural complexity of the foot, by still limited therapeutic consensus, and by the difficulty in anticipating the mechanical consequences of surgery. Hallux valgus illustrates these challenges: a common, multifactorial condition associated with a wide variety of surgical procedures, still marked by recurrences, incomplete corrections, and variable patient satisfaction. The clinical paradigm, still largely based on static observations and empirical assessment of mechanical couplings, appears insufficient to predict the postoperative function of an organ whose dynamic behaviour is central. In this context, finite element models are promising tools, but their use remains mainly associated with research. Despite the quality of existing work, their clinical integration is limited by translational barriers related to model generation, their customization based on clinically accessible data, and the lack of evidence of their postoperative predictive capacity. This thesis proposes a proof of concept for a patient-specific digital twin of the hallux valgus foot, compatible with clinical practice. The work combines a clinical study following patients throughout their care pathway, an acquisition device that can be used in a doctor's office, semi-automatic geometric customization using morphing, and biomechanical customization based on a digital experimental design with two loads: static and dynamic. This validated twin is then used to digitally reproduce the operation performed and evaluate its postoperative predictive capacity. The results show that it is possible to acquire, in a clinical environment, the data necessary for

generating patient-specific models. Biomechanical customization in two loads, moreover, makes it possible to eliminate some of the non-uniqueness in static conditions: dynamic validation distinguishes between configurations that are indistinguishable in static support and leads, for each patient, to a consistent preoperative model, with an overall dynamic error of less than 16%. Postoperative comparison then shows an average predictive capacity of close to 15%, both statically and dynamically, for the three patients. To our knowledge, this work is the first demonstration of direct predictive validation of a patient-specific finite element foot model in a postoperative context. These results suggest that it is becoming possible to translate these models from the academic field alone to clinically accessible tools capable of supporting individualized biomechanical conclusions.

LE DOYEN
Georges LEONETTI