

# COMPORTEMENT DYNAMIQUE D'UNE PROTHÈSE TIBIALE POUR LE SAUT EN LONGUEUR

**Author:** Élodie DOYEN<sup>1</sup> [elodie.doyen@ensta-paris.fr](mailto:elodie.doyen@ensta-paris.fr)  
**Co-auteur:** Nathan CANTEREL, Fabien SZMYTKA, Jean-François SEMBLAT<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> IMSIA, UMR CNRS-EDF-CEA-ENSTA Paris - Palaiseau

Conférence Sciences<sup>2024</sup>: saison 2021

<https://sciences2024.polytechnique.fr>

May 28, 2021

**Mots clés :** prothèse tibiale, dynamique, saut en longueur.

## 1 Introduction

Il est crucial de mieux comprendre le comportement dynamique de la prothèse tibiale pour les athlètes amputés pratiquant le saut en longueur (fig. 1) pour optimiser l'interaction de la prothèse avec son environnement (athlète et piste) pendant le saut et améliorer les performances tout en limitant le risque de blessure. Les interactions entre la prothèse, le sol et l'athlète sont donc analysées en détail dans cet objectif.



FIGURE 1 – Athlète amputée au niveau du tibia

Il s'agit ainsi d'étudier le comportement dynamique de ces systèmes et le rôle des éléments d'interface que sont le manchon et la rehausse (cf. fig. 2) dans la restitution d'énergie et la prévention des blessures. Cela est central dans la capacité de l'athlète à conserver le maximum d'énergie cinétique entre sa course et l'impulsion pour aller le plus loin possible[1].



FIGURE 2 – Rehausse et manchon chez l'amputé tibial

## 2 Méthode utilisée

Trois axes d'études sont privilégiés pour comprendre et optimiser le système emboîture-lame-rehausse :

- Étude expérimentale des interfaces en condition réelles ;
- Étude expérimentale des systèmes et matériaux à l'aide d'essais dédiés en conditions contrôlées et modélisation associée ;
- Optimisation topologique de la rehausse puis production par fabrication additive polymère.

### 2.1 Étude expérimentale en conditions réelles

#### 2.1.1 Emboîture

Les différentes sources de blessures chez les athlètes amputés trans-tibiaux sont :

- Les entrées d'air dans l'emboîture et la transpiration ;
- Les contacts (pression et cisaillement [2][3]) et frottements entre le manchon et l'emboîture [4] ;
- Les chocs et vibrations (particulièrement lors de la course et de la dernière impulsion).

La capacité des capteurs à réseau de Bragg, tels que développés par l'équipe d'Al Fakhi [5], pour mesurer en dynamique la pression ainsi que les contraintes de cisaillement dans l'interface entre l'emboîture et le membre résiduel sera étudiée à l'aide d'un prototype d'emboîture instrumentée non invasive.

#### 2.1.2 Rehausse

Une caméra rapide (Photron FASTCAM Mini UX100 type 800K-M-16G utilisée à 1000 Hz) est positionnée à côté de la planche d'appel (voir fig. 3) de manière à obtenir un plan rapproché de l'extrémité de la lame lors de l'impulsion. La semelle et la rehausse sont préparées avec un mouchetis pour pouvoir ensuite utiliser un logiciel de corrélation d'image (VIC-2D 6, Correlated Solutions) pour suivre les déplacements et déformations.

Une plateforme de force est ponctuellement ajoutée au protocole d'essai. Après caractérisation des matériaux il sera alors possible de remonter aux contraintes et efforts, de manière à mieux comprendre le rôle de la rehausse pour l'optimiser.

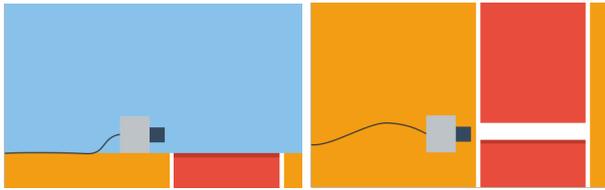


FIGURE 3 – Positionnement de la caméra par rapport à la planche d'appel

## 2.2 Étude expérimentale en conditions contrôlées

Deux montages expérimentaux sont actuellement développés pour compléter les mesures sur terrain et réaliser des études paramétriques inadaptés aux contions réelles.

### 2.2.1 Caractérisation quasi-statique

Le premier montage (voir fig. 4) s'inspire puis complète des travaux de la littérature [6].

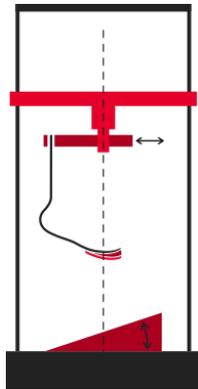


FIGURE 4 – Schéma du montage expérimental sur machine de traction

Adapté à une machine de traction/compression, le protocole permettra d'obtenir les comportements mécaniques de la rehausse et de la lame en conditions contrôlées. Le montage sera instrumenté de caméra rapides pour suivre les déformations, ainsi que de capteurs d'efforts et de moments. Plusieurs paramètres sont étudiés : la rehausse (matière, géométrie), l'angle d'impact, l'alignement de la ligne d'effort ou la surface de contact au sol. Une corrélation avec les mesures terrain sera alors proposée.

### 2.2.2 Caractérisation dynamique

Un second montage (voir fig. 5) est proposé sous forme d'une tour de chute afin d'évaluer l'influence de la rehausse sur la restitution d'énergie et la transmission des chocs et vibrations à l'emboîture. Une étude paramétrique incluant divers paramètres d'essais (hauteur de chute, surface d'impact, etc) sera alors menée.

## 2.3 Étude des matériaux

Les propriétés viscoélastiques des matériaux constituant le manchon et la rehausse seront caractérisés à l'aide d'essais adaptés. L'obtention par impression 3D est aussi étudiée, particulièrement le remplissage tant sur sa forme (voir fig. 6) que sur la possibilité de mixer les matériaux.

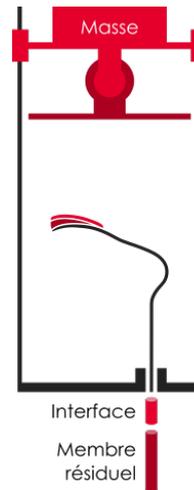


FIGURE 5 – Schéma du montage expérimental en tour de chute

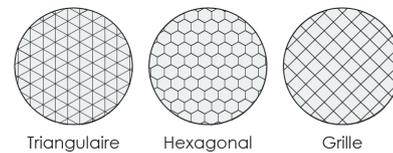


FIGURE 6 – Type de remplissage en impression 3D

## 3 Résultats obtenus

Des premières prises de vues de la rehausse ont été réalisées sur le terrain en début d'année au CREPS de Poitiers. Les images (cf. fig. 7) permettent d'évaluer de premiers ordres de grandeur des sollicitations dans la rehausse.



FIGURE 7 – Image prise au CREPS de Poitiers

## 4 Modèles

Un modèle de propagation d'onde unidimensionnel est proposé (voir fig. 8). Une fois complètement ajusté et alimenté par les données expérimentales, il permettra d'optimiser les contrastes de propriétés nécessaires à l'amélioration des performances et à la prévention des blessures.

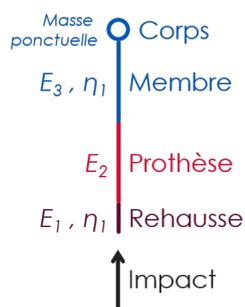


FIGURE 8 – Modèle unidimensionnel de propagation d’ondes

## 5 Conclusion et perspectives

Le but de cette étude est d’optimiser l’interaction de la prothèse avec son environnement pour améliorer les performances tout en limitant le risque de blessure.

Pour mieux comprendre la prothèse tibiale deux nouveaux montages expérimentaux en laboratoire sont proposés pour caractériser son comportement quasi-statique et dynamique. L’étude est complétée par un modèle simple d’optimisation de propriétés mécaniques et des mesures de plusieurs paramètres biomécaniques sur terrain.

À long terme, les attendus livrables sont une emboîture instrumentée permettant un réglage plus facile pour l’athlète et une rehausse optimisée en matière et forme.

## 6 Remerciements

La Fondation EDF et l’ENSTA pour le financement du projet ; le LadHyX pour le soutien matériel et particulièrement Caroline COHEN pour son aide et sa présence lors des événements sportifs ; Olivier PAULY et FFH pour ses remarques avisées et son point de vue sportif sur le sujet ; l’ensemble des athlètes qui ont participé aux sessions d’enregistrement de données : Marie-Amélie LE FUR, Dimitri PAVADÉ, Tiphaine SOLDE et Aboubacar SYLLA.

## Références

- [1] Olivier Pauly. *Le Saut En Longueur*. Edilivre, 2015.
- [2] S. Portnoy, G. Yarnitzky, Z. Yizhar, A. Kristal, U. Oppenheim, I. Siev-Ner, and A. Gefen. Real-Time Patient-Specific Finite Element Analysis of Internal Stresses in the Soft Tissues of a Residual Limb : A New Tool for Prosthetic Fitting. *Annals of Biomedical Engineering*, 35(1) :120–135, January 2007.
- [3] Brit Maike Quandt. *Optical Fibre Textiles in Non-Invasive Medical Applications*. Doctoral Thesis, ETH Zurich, 2016.
- [4] M. Moebis, S. Ehrler, and S. Coulon. Est-il possible de dégager un algorithme de prescription des manchons prothétiques pour amputations tibiales ? Étude préliminaire. *La Lettre de médecine physique et de réadaptation*, 25(4) :182–187, December 2009.

- [5] Al-Fakih, N. E., Arifin, G. Pirouzi, F. R. Mahamd Adikan, H. N. Shasmin, and N. A Abu Osman. Optical fiber bragg grating-instrumented silicone liner for interface pressure measurement within prosthetic sockets of lower-limb amputees. *Journal of biomedical optics*, 22(8) :1–8, 2017.
- [6] Owen N. Beck, Paolo Taboga, and Alena M. Grabowski. Characterizing the Mechanical Properties of Running-Specific Prostheses. *PLOS ONE*, 11(12), 2016.