

# IT'S GOING TIBIA OK: PROSTHETIC DESIGN USING FREEDOM AN CONSTRAINT TOPOLOGY (FACT)

Prix étudiants de l'ARC

ÉDITION 2022-2023

**Yu Ran Wang**  
Étudiante en Sciences pures et appliquées (Honours)  
Collège Marianopolis

Sous la supervision de  
Angela Keane, professeure de chimie

## 1. INTRODUCTION

On compte quelque 650 millions de personnes handicapées dans le monde, dont 80 % vivent dans des pays à faibles revenus et exercent des professions à haut risque de blessure<sup>1</sup>. Le recours à des prothèses y est limité en raison de frais exclusifs allant de 5 000 à 70 000 dollars américains et de l'inégalité d'accès aux services médicaux<sup>2</sup>.

## 2. OBJECTIFS

L'objectif de ce projet était de créer une prothèse servant dans les cas d'amputation au-dessus du genou en utilisant des mécanismes souples de façon à réduire le prix, à maintenir des mouvements fluides, et à offrir un produit personnalisable en fonction de la taille, du poids et de la démarche des utilisateurs, et imprimable en 3D en une seule pièce.

## 3. MATÉRIAUX

Le modèle de la prothèse est imprimé en PETG (téréphtalate de polyéthylène), un polymère plastique. Sans être idéal, ce matériau est choisi en raison du faible coût et de l'accessibilité de la technologie d'impression 3D<sup>3p(30)</sup>. L'aluminium 7075, un alliage adéquat pour les applications souples, serait utilisé pour l'impression d'un prototype final.

Les équations de matrice permettent de calculer la rigidité et la vrille des mécanismes<sup>4</sup>. Les résultats de ces opérations sont confirmés par les données expérimentales.

Figure 1 Des calculs en utilisant les propriétés du PETG

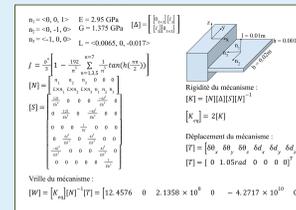


Tableau 1 PETG en comparaison avec l'aluminium 7075

Matériaux d'impression	PETG (téréphtalate de polyéthylène)	Aluminium 7075
Considérations	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abordable</li> <li>Susceptible au fluage et aux contraintes</li> <li>Cassante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Résistant</li> <li>Relativement souple</li> <li>Usinable</li> <li>Léger</li> </ul>
Propriétés des matériaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>Module de Young : 2,95 GPa</li> <li>Module de cisaillement : 1,375 GPa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Module de Young : 68 GPa</li> <li>Module de cisaillement : 25 GPa</li> </ul>

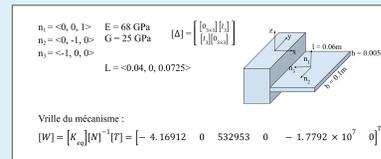
Tableau 2 Déplacement de l'élément flexible comparé au charge

Charge (kg)	Déplacement angulaire (degrés)	Déplacement angulaire (radians)
0	0	0
0,356	8,5	0,14835296
0,630	15	0,26179933
0,874	24	0,41887893
1,083	32	0,55850524
1,302	47	0,82030458
1,415	53	0,92502431
1,507	60	1,04719733

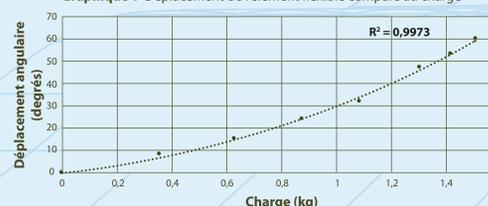
À partir des équations de matrices, c'était prévu que 1,3 kg de charge serait nécessaire pour atteindre un déplacement angulaire de 60 degrés.

$$\text{différence en pourcentage} = \frac{\text{théorique} - \text{expérimental}}{\frac{(\text{théorique} + \text{expérimental})}{2}} \times 100 = \frac{1,3 - 1,507}{\frac{(1,3 + 1,507)}{2}} \times 100 = 14,75\%$$

Figure 2 Répétition des calculs en utilisant les propriétés de l'aluminium

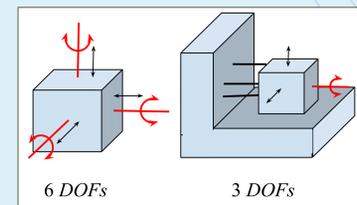


Graphique 1 Déplacement de l'élément flexible comparé au charge



## 4. RÉSULTATS

Au cours d'une marche naturelle, le genou, les muscles et les tendons assurent la stabilité et les mouvements en se contractant et en se relâchant. Les éléments flexibles de la prothèse ont la capacité cruciale de reproduire de manière très proche ces mouvements complexes.



FACT [Freedom and Constraint Topology] est un processus de conception systématique qui indique les directions dans lesquelles le produit se révélera souple ou rigide. À partir de la Blanding's Rule of Complimentary Patterns, des espaces de liberté sont générés quand les vecteurs de rotation ou de translation géométrique croisent toutes les lignes de restriction linéairement indépendantes. Ces espaces correspondent aux degrés de liberté (DOF), qui montrent les façons dont une structure peut bouger, établissant un référentiel pour un ensemble fini de structures possibles. Sans le recours à la méthode FACT, les possibilités sont infinies.

Il y avait trois articulations à considérer : le genou, la cheville et le pied. À partir de FACT, une lame en forme de W, représentant des plans de restriction qui se croisent, a été placée pour imiter les mouvements du genou, comme le montre le schéma 1. Elle ne produit qu'un seul DOF, qui est une rotation à la ligne d'intersection entre les plans. La cheville et le pied ont été combinés en un seul mécanisme flexible pour stabiliser la prothèse. Celle-ci s'adapte au mouvement du moignon du porteur et à la force de contact entre le pied et le sol, éliminant les capteurs et les équipements hydrauliques. Les mécanismes internes, comme le montre le schéma 2, ont été conçus en utilisant l'approche « instant-center », qui assure le transfert de la force, le changement de sa direction et la personnalisation facile en fonction de la marche du porteur<sup>5</sup>. En modifiant les longueurs des éléments internes, le rapport des forces peut être manipulé avec l'équation  $\frac{f_{out}}{f_{in}} = \frac{D}{C} \times \frac{B}{A}^5$ .

## 5. CONCLUSION

Le résultat est une prothèse plus rentable que celles de conception traditionnelle. Elle permet également une personnalisation et une adaptation simple aux habitudes de marche des personnes amputées.

Tableau 3 Coût prévu pour le prototype comparé au prix moyen actuel

% prévu du coût total		Prix moyen actuel (\$CAD)	Coût prévu pour le prototype (\$CAD)
8 %	Coût des matériaux (5 \$/kg)		0,027381m <sup>3</sup> * 2700 kg/m <sup>3</sup> = 73,9287 kg = 369,64 \$
18 %	Fusion Sélective Laser (SLM)		831,69 \$
7 %	Élimination des supports		323,44 \$
57 %	Usinage CNC		2 633,69 \$
3 %	Distension des matériaux		138,62 \$
7 %	Traitement thermique		323,44 \$
	Coût total	17 000 \$	4 620,52 \$

<sup>1</sup> Harkins, C.S., McGarry, A., Buis A. « Provision of prosthetic and orthotic services in low-income countries: a review of the literature », *Prosthet Orthot Int.*, 2013, 37(5), 353-61. <http://dx.doi.org/10.1177/0309364612470963>  
<sup>2</sup> Rudder, J. « What is the Cost of a Prosthetic Leg? », OPC Prosthetic Centers. <https://opcenters.com/what-is-the-cost-of-a-prosthetic-leg/#:~:text=%20For%20patients%20without%20health%20insurance,leg%20controlled%20by%20muscle%20movements.>  
<sup>3</sup> Howell, L.L. *Compliant Mechanisms*, Nashville, TN, John Wiley & Sons, 2001.  
<sup>4</sup> *The FACTS of Mechanical Design. Compliant mechanisms lecture series introduction.* YouTube, 2021. [https://www.youtube.com/watch?v=j1T1RtKnms&list=PLWeErkRyxkhKL\\_pjYBCR2jYcvAh5PaXoP&index=1](https://www.youtube.com/watch?v=j1T1RtKnms&list=PLWeErkRyxkhKL_pjYBCR2jYcvAh5PaXoP&index=1)  
<sup>5</sup> Hopkins, J. B. *Design of parallel flexure systems via Freedom and Constraint Topologies (FACT)*, Massachusetts Institute of Technology, 2007.

Révision linguistique : Le crayon rouge enr. Mise en page : Association pour la recherche au collégial