

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET
POPULAIRE MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département Métallurgie

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des matériaux

Optimisation de la Conception et Fabrication d'un Pied
Prothétique à Restitution d'Énergie pour Amputés

Réalisé par : **YAHY Ramdane**

Sous la direction de **Dr. BELOUADAH Zouheyr** ENP

Présenté et soutenu publiquement le (30/11/2025)

Composition du jury :

Président :	M. Choayb BOUHAFS	MCA	ENP
Examineur :	M. Hamid SEDJAL	MAA	ENP
Encadrant :	M. Zouheyr BELOUADAH	MCA	ENP
Invité :	M. Lahlah Karim	/	ENP

ملخص

يركّز هذا المشروع على تصميم ومحاكاة وتصنيع قدم اصطناعية ذات نظام تخزين واسترجاع للطاقة (ESAR) مخصّصة لذوي البتر تحت الركبة وفوقها. ويهدف العمل إلى توفير حل محلي ميسور وفعال يمكن أن يشكّل بديلاً للأقدام الاصطناعية المستوردة ذات التكلفة العالية. تم تصميم القدم باستخدام برنامج SolidWorks ، حيث تتكوّن من شفرة سفلية، وشفرتين علويتين، وأسطوانة تعمل ككاحل اصطناعي. يهدف هذا التكوين إلى امتصاص الصدمة، وتخزين الطاقة أثناء مرحلة الارتكاز، ثم استرجاعها عند الدفع. كما أُجريت محاكاة بالعناصر المحدودة باستخدام ANSYS Mechanical ، مع اعتماد خصائص مركبة متعامدة الاتجاه مُعرّفة في ANSYS ACP (pre) وقد قيّمت التحليلات الثابتة الإجهادات ومعاملات الأمان لمستخدم يزن 70 كغ. أخيراً، تم تصنيع نموذج أولي من مركّب الكربون/الإيبوكسي، مؤكّداً موثوقية التصميم وإمكان تطبيقه محلياً.

الكلمات المفتاحية: قدم اصطناعية، نظام تخزين واسترجاع الطاقة (ESAR) ، البتر، مركّب كربون/إيبوكسي، تحليل العناصر المحدودة، ANSYS، التصميم الميكانيكي، SolidWorks، التصنيع المحلي.

Abstract

This project focuses on the design, numerical simulation, and fabrication of an Energy Storage and Return (ESAR) prosthetic foot for transtibial and transfemoral amputees. The goal is to offer a local, affordable, and well-adapted alternative to imported dynamic prosthetic feet, which are often expensive. The foot is designed using SolidWorks and includes a plantar blade, two upper blades, and a cylindrical ankle component. This structure is intended to absorb impact, store energy during stance, and release it during push-off. Finite element simulations are carried out with ANSYS Mechanical using orthotropic composite properties defined in ANSYS ACP (pre). Static analyses for a 70-kg user evaluate stress and safety. A carbon/epoxy composite prototype is then manufactured, confirming the reliability and local potential of the design.

Keywords: Prosthetic foot, ESAR, amputation, carbon/epoxy composite, finite element analysis, ANSYS, mechanical design, SolidWorks, local manufacturing.

Résumé

Ce projet porte sur la conception, la simulation et la fabrication d'un pied prothétique à restitution d'énergie (ESAR) destiné aux amputés transtibiaux et transfémoraux. L'objectif est d'offrir une solution locale, plus accessible et adaptée, capable de remplacer les modèles importés souvent coûteux. La conception est réalisée sous SolidWorks et s'appuie sur une lame plantaire, deux lames supérieures et un cylindre jouant le rôle de cheville, afin d'absorber le choc, stocker l'énergie de l'appui et la restituer lors de la propulsion. Une analyse par éléments finis est effectuée avec ANSYS Mechanical, en utilisant des propriétés orthotropes définies via ANSYS ACP . Des simulations pour un utilisateur de 70 kg évaluent contraintes et sécurité. Un prototype en carbone/époxy est ensuite fabriqué, confirmant la fiabilité et le potentiel local de la conception.

Mots-clés :

Pied prothétique, ESAR, amputation, composite carbone/époxy, éléments finis, ANSYS, conception mécanique, SolidWorks, fabrication locale.

Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale	12
Chapitre 1 : état de l'art des pieds prothétiques à restitution d'énergie	15
1.1. Amputation du membre inférieur : chiffres et statistiques	15
1.1.1. Étiologie	15
1.1.2. Prévalence	16
1.2. Définition du cycle de marche	17
1.2.1. Définition des termes spécifiques à l'analyse du mouvement humain	17
1.2.2. La morphologie du pied	18
1.2.2.1. Les articulations du pied	19
1.2.2.2. Les arches plantaires	20
1.2.3. Mouvement de l'articulation de la cheville	22
1.2.4. Le cycle de marche	22
1.3. Appareillages pour amputés : pied à restitution d'énergie	24
1.3.1. Les prothèses : définition et fonction principale	25
1.3.2. Les composants d'une prothèse	25
1.3.3. Les types de prothèses	27
1.3.4. Les niveaux de mobilité fonctionnelle des amputés du membre inférieur :	28
1.3.5. L'état de l'art des prothèses à restitution d'énergie	30
1.3.5.1. La tendance de la technologie ESAR	30
1.3.5.2. L'émergence de la technologie ESAR	30
1.3.5.3. Pied ESAR vs pied conventionnel	31
1.4. Aperçu sur les matériaux composites	32
1.4.1. Définition d'un matériau composite	32
1.4.2. Les constituants	32
1.4.2.1. La matrice	32
1.4.2.2. Le renfort	33
1.4.2.3. Additifs	35
1.4.3. Les préimprégnés	35
1.4.4. Architecture des matériaux composites	36
1.4.4.1. La structure stratifiée	36
1.4.4.2. La structure sandwich	37
1.4.5. Procédés de fabrication	38
1.4.5.1. Hand-layup	38
1.4.5.2. Infusion sous vide	38
1.4.5.3. Resin transfer moulding	39
1.4.5.4. Vacuum-assisted resin transfer moulding (VARTM)	39
1.4.5.5. Moulage par compression	40
1.4.6. Mécanismes de rupture et de défaillance des matériaux composites	41

1.4.6.1.Fissuration de la matrice	41
1.4.6.2. Décohésion fibre-matrice	41
1.4.6.3. Décollement interlaminaire (délaminage)	41
1.4.6.4. Rupture des fibres	42
Chapitre 2 : Conception mécanique de la prothèse de pied	44
2.1. L'objectif de la conception	44
2.2. Le cahier des charges à remplir	44
2.3. Les principaux composants du pied et sélection des matériaux	45
2.4. La conception des composants et leurs caractéristiques fonctionnelles	45
Chapitre 3 : Évaluation numérique du pied prothétique par la méthode des éléments finis	53
3.1. La méthode des éléments finis (MEF)	53
3.1.1. Définition de la MEF	53
3.1.2. Historique de la méthode	53
3.1.3. Principe de la méthode	53
3.1.4. Étapes de résolution d'un problème par éléments finis	54
3.1.5. Les types d'analyse par éléments finis	56
3.1.6. Les applications de la méthode des éléments finis	56
3.1.7. Avantages de la méthode EF	57
3.1.8. Logiciels de simulation utilisant la méthode EF	57
3.2. Le choix du logiciel de simulation	57
3.3. Présentation de l'ANSYS	58
3.3.1. Ansys Workbench	58
3.3.2. Ansys Mechanical	59
3.3.2.1. Fonctionnalités principales de l'Ansys Mechanical	59
3.3.2.2. Workflow typique dans Ansys Mechanical	60
3.3.3. Ansys ACP (PrepPost)	61
3.4. Les étapes de la simulation du pied prothétique avec Ansys	61
3.4.1. Prétraitement sur ACP (pre)	61
3.4.2. Préparation des composants non-composites sur Modèle Mechanical	70
3.4.3. Analyse statique avec Ansys Mechanical	73
3.4.4. Résultats de la simulation	77
3.4.5. Interprétation des résultats	82
Chapitre 4 : Fabrication du prototype du pied prothétique	85
4.1. Le choix de la méthode de fabrication	85
4.2. La fabrication du prototype	87
4.2.1. Matériels et matériaux nécessaires	87
4.2.2. Protocole de fabrication	87
4.3. Résultats et remarques	94
Conclusion et perspectives	96
Références bibliographiques	98

Confidentiel