

2019 – 2020

3^e Année – Polytech Angers

Spécialité Qualité, Innovation, Fiabilité



Rapport de projet recherche

Les prothèses du membre inférieur

Martin Preaubert



Santé-OK



La prothèse générale



Orthofiga

Encadrant : Pascal CRUBLEAU

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier mon encadrant, Monsieur CRUBLEAU, qui m'a énormément aidé dans ce travail de recherche scientifique grâce à ses conseils et sa disponibilité lors de nos réunions hebdomadaires.

Ensuite, je souhaite adresser un grand merci à Monsieur BOISORIEUX, prothésiste de l'entreprise Orthofiga, qui a accepté de me consacrer du temps pour un entretien téléphonique et pour répondre à mes questions.

Engagement de non plagiat

Je soussigné Martin PREAUBERT, déclare être pleinement conscient que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiée sur toutes formes de supports, y compris sur internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée.

En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce rapport ou mémoire.

Signé par l'étudiant(e) le 07/07/2020

SIGNATURE

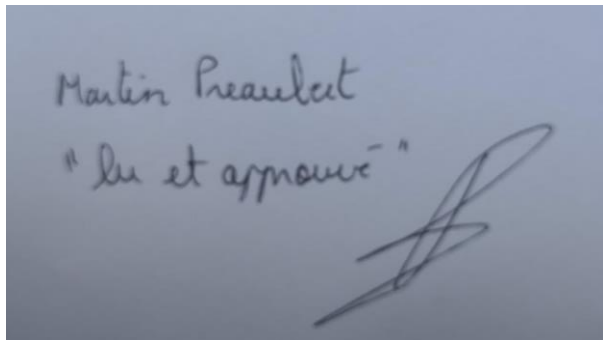
A photograph of a handwritten signature in blue ink on a light blue background. The signature reads "Martin Preaubert" followed by "lu et approuvé" in quotes. To the right of the text is a stylized, cursive signature.

Table des matières

I – Introduction.....	P6
A – Motivation du choix du sujet.....	P6
B – Présentation de la problématique.....	P6
II – Etat de l’art.....	P8
A – Les prothèses du membre inférieur.....	P8
B – Environnement des PMI.....	P10
C – Les contraintes et les limites des PMI.....	P11
D – Des pistes de solutions.....	P13
III – Action mise en place.....	P15
A – Présentation de l’action.....	P15
B – Mise en œuvre de l’action.....	P15
C – Résultats et discussion.....	P17
IV – Synthèses d’articles scientifiques.....	P18
A – « A human-machine centered design method for lower limb prosthetics »	P18
B – « Adaptive Sports Technology and Biomechanics : Prosthetics »	P20
C – « Joint work and ground reaction forces during running with daily-use and running specific prostheses »	P22
V – Conclusions.....	P24
A – Conclusion de la problématique.....	P24
B – Conclusion personnelle sur le travail de recherche.....	P25
VI – Bibliographie.....	P26
VII – Annexes.....	P28
A1 : Les types de PMI selon les zones d’amputation du membre inférieur.....	P28
A2 : MindMap des technologies employées dans la composition des PMI.....	P29
A3 : Synopsis des différents assemblages et compositions des PMI.....	P31
A4 : Les causes des amputations.....	P33
A5 : Les prix des PMI en fonction des composants.....	P33

Glossaire

Biomécanique : Application des lois de la mécanique aux problèmes de la biologie, de la physiologie et de la médecine.

Capteur de mouvements optoélectroniques : Technologies employées pour détecter de manière stable la présence d'objets. Ces capteurs détectent les formes, les couleurs, les distances et les épaisseurs avec de grandes précisions.

Cycle de marche : Nous distinguons deux phases lors de la marche. La phase d'appui qui correspond aux périodes où le pied est en contact avec le sol. La phase oscillante correspond à l'avancée du membre inférieur lorsque le pied n'est plus en contact avec le sol.

Défaillance cutanée : Des fragilités de la peau causées par des frottements, des chocs qui rendent la peau fine, fragile, qui perd son élasticité et sa fonction de barrière.

Ischion : L'ischion représente la partie postérieure de l'os de l'articulation de la hanche

Membre inférieur : Membre qui permet à l'homme, qui en possède deux, de se déplacer. Il est situé sous le bassin et comprend six parties : la région glutéale, la cuisse, le genou, la jambe, la cheville et le pied.

Membre résiduel : Ce qui reste d'un membre ou d'un organe que l'on a amputé.

Quality Function Development : Une matrice QFD est un outil d'aide à la décision dans la conception de produits ou de services. La matrice QFD couple les caractéristiques et les paramètres physiques pour ressortir les solutions envisagées.

Réaction du sol : L'action mécanique d'un objet appliquée sur le sol engendre une force de réaction. Les propriétés de la force de réaction dépendent de l'action mécanique. Cette force de réaction permet de déplacer l'objet, de modifier sa trajectoire, et de déformer l'objet s'il est déformable.

Mots clés

Prothèse du membre inférieur

Prothèse sportive

Composition des prothèses

Environnement des prothèses

Équipement, appareillage

Liste des acronymes

OPR : Orthèse Prothèse Rééducation

PC : Prothèse de course

PG : Prothèse générale

PMI : Prothèse du membre inférieur

QFD : Quality Function Development

Liste des figures

Figure 1 : Différentes compositions des PMI

Figure 2 : Répartition des amputés selon le niveau d'amputation

Figure 3 : Répartition et évolution selon le sexe Sex-ratio

Figure 4 : Répartition des amputés en fonction de l'âge

Figure 5 : PMI conçue en impression 3D

Figure 6 : Logo entreprise Orthofiga

Figure 7 : Déroulement de la conception de la PMI en fonction des facteurs humains et techniques

Figure 8 : Différentes géométries de lames de course

Figure 9 : Prothèse de ski accrochée au ski

Figure 10 : Diagrammes des réactions du sol en fonction du type de prothèses et de l'allure de course

Figure 11 : Boîte à moustache de la réaction des différentes articulations de la jambe et des prothèses en fonction des facteurs ANOVA

Figure a : Les zones d'amputation des membres inférieurs

Figure b : Synopsis des composants des prothèses fémorales

Figure c : Synopsis des composants des prothèses tibiales

I - Introduction

A - Justification du choix du sujet

Chaque année, les élèves de première année du cycle ingénieur de Polytech Angers doivent pratiquer un stage de fin d'année à l'étranger.

Je souhaite exercer ma carrière professionnelle dans la recherche et le développement de produits sportifs car je suis un passionné de sport depuis mon enfance. Mon objectif personnel pour ce stage était de trouver un laboratoire de recherche évoluant dans le domaine du sport afin de recueillir le plus d'expériences possibles dans ce domaine.

Après des recherches actives, j'ai réussi à lister les rares universités disposant de laboratoires de recherche orientés vers le sport, auxquels j'ai envoyé mes candidatures.

J'ai reçu une réponse positive d'un laboratoire de recherche de l'université de Coimbra au Portugal. Ce laboratoire évolue dans la science du corps humains et de la biomécanique pour des activités sportives, ce qui représentait, vu mes objectifs personnels, une vraie victoire.

Malheureusement, la crise sanitaire apparue fin 2019 a bouleversé la fin d'année scolaire avec l'annulation du stage à l'étranger.

Pour remplacer le stage à l'étranger, les responsables de mon école ont organisé et mis en place un travail de fin d'année basé sur une initiation à la recherche scientifique, sur le thème de notre choix. Dès le début du projet, mon intention était de travailler sur le domaine du sport combiné à un aspect médical. J'ai donc orienté mon projet sur les prothèses sportives et ma problématique sur ce thème afin de mieux appréhender leur utilité dans le monde médical de notre société.

Pour commencer le projet, j'ai effectué un travail de découverte du domaine des prothèses. A travers ces premières recherches, j'ai appris à connaître cet environnement et je me suis rendu compte de l'étendue des catégories de prothèses, comme celles dédiées aux personnes ayant subi une amputation du membre inférieur ou du membre supérieur.

Finalement, j'ai décidé d'axer mon travail sur les prothèses de membres inférieurs et non sur les prothèses sportives. En effet, j'ai rencontré des difficultés pour trouver des sources d'informations fiables compte tenu de l'évolution constante de la technologie et de la grande diversité des prothèses.

B - Présentation de la problématique

D'après l'Organisation Mondiale de la Santé, la pratique régulière d'activités diverses comme le sport ou les loisirs, et une alimentation saine, sont des facteurs majeurs pour rester en bonne santé.

La pratique d'activités sportives permet aux personnes handicapées de bénéficier de nombreux bienfaits physiques et psychologiques avec l'augmentation de la capacité fonctionnelle, l'amélioration de la résilience et le renforcement de l'estime de soi [2].

La volonté de rester en bonne santé est important pour chaque être humain, mais le rester est plus difficile pour les personnes handicapées car ils sont confrontés à des problèmes induits par leur handicap.

Je me suis aussi aperçu que le port de la prothèse peut générer de nombreuses contraintes aux patients : Une limite des fonctionnalités, une mauvaise adaptabilité, des problèmes d'accessibilité, des soucis techniques et un prix très coûteux.

Ma problématique pour ce travail de recherche est de comprendre s'il est possible de limiter les contraintes et d'améliorer la vie des patients porteurs de PMI :

Est-il possible de concevoir une prothèse de membre inférieur multifonctionnelle aux activités générales et sportives, pour la rendre plus accessible aux personnes souffrant d'amputation de ce membre ?

L'idée de cette problématique est d'analyser l'environnement et les technologies des PMI afin de comprendre s'il est possible de concevoir une PMI capable de réaliser des multiples activités du quotidien, des activités sportives et de loisirs.

Dans un premier temps, nous allons étudier l'état de l'art des PMI afin de comprendre ce domaine et de découvrir les technologies actuelles existantes.

La seconde partie présentera une interview d'un prothésiste professionnel, Monsieur BOISORIEUX, qui nous aidera à analyser et à répondre à la problématique.

En troisième partie, nous retrouverons la synthèse et l'analyse de trois articles scientifiques qui nous permettront également de compléter nos éléments de réponse.

Pour finir, nous procèderons à la conclusion de ce travail de recherche sur les aspects scientifiques et sur ce que ces travaux m'ont apportés à titre personnel.

II - Etat de l'art

A – Les prothèses de membres inférieurs

a) Définition des prothèses de membre inférieur (PMI)

Une exoprothèse est « implantée dans l'organisme » pour suppléer une partie manquante du corps. Le patient la porte sur le corps en la mettant et en l'ôtant [9]. Une PMI est une exoprothèse dédiée au membre inférieur du corps humain.

Son principal rôle est de remplacer le fonctionnement de la partie manquante de la jambe pour aider le patient à effectuer des déplacements et des mouvements (Cfr Annexe 4). Les PMI sont primordiales pour les personnes présentant ces handicaps, car ces dispositifs apportent aux patients « une autonomie et une insertion sociale » [20].

b) La constitution des prothèses de membre inférieur

Le niveau du membre résiduel (Cfr Annexe 1) et les besoins du patient caractérisent les compositions des PMI. Les PMI sont composées de plusieurs parties [17] [20].

L'emboiture est le point de liaison entre la prothèse et le moignon. Elle recueille le membre du patient et elle est soutenue par un cadre afin de maintenir la structure. L'emboiture est importante car sa conception sur mesure doit s'adapter au moignon du patient et elle transmet le mouvement du moignon au reste de la prothèse. Sa construction à base de matière plastique, de carbone ou de matière stratifiée donne un meilleur accrochage, une gestion du volume et une répartition de l'appui pour le patient. Le patient déroule **un manchon** sur son membre résiduel afin d'ajuster le serrage du moignon dans l'emboiture. La composition du manchon en polyuréthane ou en silicone permet de limiter les frottements et améliore le confort du patient au port de l'emboiture.

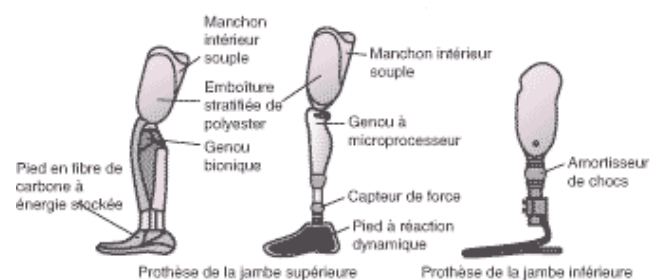


Figure 1 : Différentes compositions des PMI

Les parties articulées sont constituées de technologies pointues afin de reproduire les articulations de la jambe. Ces technologies améliorent la gestuelle de la prothèse en facilitant les mouvements du patient lors du cycle de marche. Elles donnent l'opportunité au patient d'acquérir de nouvelles positions (debout, assises). Il existe une grande diversité de ces technologies qui répondent à des besoins différents selon les capacités du patient (Cfr Annexe 2).

Les éléments de jonctions sont des liaisons tubulaires constituées de tiges métalliques et de structures en fibre de carbone. Ces composants détiennent des capacités comparables aux propriétés physiques de la jambe pour stocker et libérer les retours d'énergie lors des mouvements [17].

La partie terminale de la prothèse se caractérise par un pied prothétique qui repose sur le sol. Les pieds prothétiques sont construits en matériau à mémoire de forme et ils disposent d'un profil capable de reproduire le déroulement du pied lord du cycle de marche [6].

Le revêtement a pour objectif de représenter le membre manquant du patient, et de masquer la partie mécanique de la prothèse. Le revêtement est généralement conçu à partir de mousse et il est recouvert d'une protection naturelle [17].

c) Les catégories de prothèses de membre inférieur

Les PMI sont majoritairement conçues pour répondre à des enjeux majeurs, en redonnant des fonctionnalités perdues aux patients. Outre l'acquisition de plus d'autonomie, il existe de nombreuses autres fonctions qui procurent aux patients un meilleur confort et un sentiment de sécurité. Afin de répondre aux exigences multiples des patients, nous remarquons qu'il existe une multitude de composants techniques sur le marché des prothèses (Cfr Annexe 2).

L'assemblage des différents éléments techniques contribue à une conception « sur mesure » des prothèses inférieures (Cfr Annexe 3). Ainsi, il existe une multitude de PMI propres à chaque utilisateur. Parmi l'utilisation des prothèses inférieures, nous pouvons les diviser en deux types : les prothèses du quotidien et les prothèses sportives [21].

Les prothèses de quotidien accompagnent l'utilisateur continuellement afin de remplacer le fonctionnement du membre perdu. Les prothèses générales apportent du confort entre l'appareillage et le membre résiduel. Pour cela, elles se focalisent sur l'ergonomie et le confort de marche lors des efforts.

La conception des prothèses du quotidien est construite pour aider l'utilisateur à effectuer plusieurs types de tâches, pratiquer des activités professionnelles et de loisirs et réaliser des mouvements complexes pour monter les escaliers et prendre une position assise [3].

Les prothèses sportives répondent à des exigences fonctionnelles et biomécaniques en fonction du sport pratiqué. La composition de ces prothèses varie selon les sports, l'alignement au corps du patient, l'absorption des chocs et de nombreux critères techniques [4].

Parmi les différentes catégories de prothèses sportives, nous retrouvons les célèbres **prothèses de courses** qui sont constituées de lame en fibre de carbone afin d'apporter sûreté, souplesse et propulsion lors de la course à pied.

Les prothèses de sport à impact sont conçues à base de composants bien spécifiques pour résister aux contraintes et aux impacts du sol qui s'appliquent sur le pied prothétique et l'emboîture de la prothèse.

Les prothèses pour sport de glisse sont composées de géométries variées afin de s'adapter aux flexions requises pour le sport de glisse.

Les prothèses de bain et les prothèses aquatiques sont fabriquées pour effectuer des mouvements de nage et ses composants sont résistants à l'eau [21].

d) Les technologies employées pour la conception des prothèses inférieures

Afin de répondre au mieux aux fonctionnalités techniques selon les domaines d'applications (activités sportives, activité du quotidien), les prothèses doivent respecter des géométries et des alignements du corps bien précis grâce à des technologies de pointe (Cfr Annexe 2). Ces procédés techniques permettent de soulager les efforts du patient lors du cycle de marche entre les phases d'appui et oscillante [5]. Elles permettent également de reconstituer des mouvements spécifiques de la jambe (articulation, flexion) pour des activités adaptées.

Les matériaux constituant les PMI répondent à trois critères pour être adapté aux besoins des PMI.

La biocompatibilité permet aux PMI d'avoir une bonne tolérance et d'être acceptée par l'organisme humain. La résistance à la corrosion permet aux matériaux des PMI de perdurer dans le temps. Les propriétés mécaniques des matériaux sont primordiales pour donner aux PMI la possibilité d'effectuer des mouvements spécifiques. Les matériaux constituant les PMI doivent s'articuler entre eux afin de résister aux forces de frottement et aux actions extérieures qui s'appliquent sur les prothèses [28].

Les constituants des PMI sont constitués de différents matériaux selon les besoins.

L'emboiture est constituée de résine et de fibre de carbone pour gagner en légèreté.

Le manchon est construit en silicone, en copolymère, polyuréthane ou mousse pour protéger et conforter le membre résiduel.

Les éléments de jonction sont faits de matériaux solides tels que l'inox, d'alliage, de titane, de carbone ou d'aluminium pour assurer la résistance de la structure lors des mouvements [27].

Les prothèses sportives détiennent des matériaux rares et différents des prothèses du quotidien. Elles sont construites de matériaux en fibre de carbone ou de kevlar. Ces matériaux sont conçus de fibres très fines apportant aux prothèses sportives de la souplesse, de la légèreté et de la résistance pour les efforts sportifs [27].

B – Environnement des prothèses de membres inférieurs

a) Des chiffres clés

Il est difficile de trouver des chiffres récents sur la population d'amputé en 2020, car les recherches statistiques de la population portant des prothèses sont rares de nos jours : « les statistiques sur le nombre d'amputations en France sont rares et anciennes » [15].

La population française d'amputés portant une PMI était estimée à 90 000 patients d'après les chiffres de 2014. Le nombre d'amputation du membre inférieur tourne aux alentours de 10 000 cas chaque année [3]. Les entreprises prothésistes privées françaises distribuent des exoprothèses de toutes catégories allant de 12 000 à 15 000 dispositifs par an [15]. Cette stabilité est due aux origines des amputations qui n'évoluent pas dans le temps (Cfr. annexe 4).

La figure 2 nous indique que 95% de la population des amputés présente une amputation du membre inférieur en 2004. Parmi cette population, 69% des patients étaient des hommes selon la figure 3. Nous remarquons sur la figure 4 que 74% des personnes amputées ont un âge supérieur ou égal à 54 ans. Ces chiffres nous prouvent que les PMI sont majoritairement utilisées par des personnes âgées causées par des amputations liées à des maladies [25] (Cfr annexe 5).

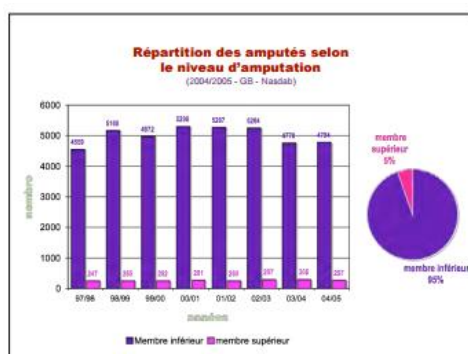


Figure 2 : Répartition des amputés selon le niveau d'amputation

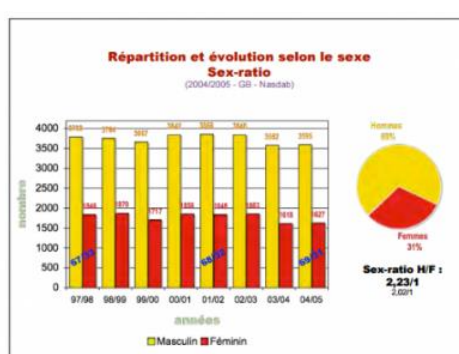


Figure 3 : Répartition et évolution selon le Sex-ratio

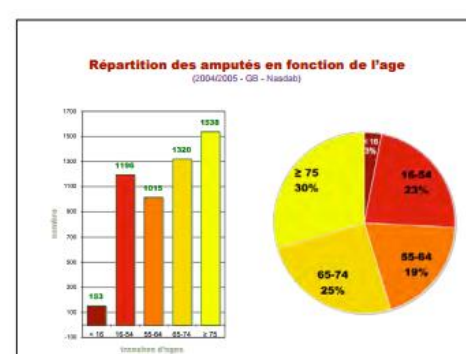


Figure 4 : Répartition des amputés en fonction de l'âge

b) La distribution des prothèses de membres inférieurs

Les PMI sont distribuées aux patients par des entreprises prothésistes privées, et l'acquisition d'une PMI se fait en plusieurs étapes.

Tout d'abord, il y a le premier contact avec le patient qui permet au prothésiste de comprendre le parcours de vie, les besoins et les attentes du patient.

S'ensuit la prise d'empreinte du moignon avec une méthode artisanale de moulage, suivis des mesures des manchons adaptés au moignon du patient.

La seconde étape correspond à la fabrication de l'emboiture et à l'assemblage d'une prothèse provisoire. Le patient est accompagné d'un prothésiste et d'un kinésithérapeute dans un centre de rééducation, pour s'exercer à la manipulation de la prothèse provisoire et adapter les meilleurs réglages, apportant au patient la mécanique de marche la plus physiologique.

La dernière étape s'effectue par le médecin qui prescrit la prothèse finale au patient [20].

C – Les contraintes et les limites des prothèses inférieures pour les patients

a) Des accessibilités limitées

Nous avons vu que le processus d'acquisition d'une prothèse est long et coûteux au sein des entreprises prothésistes et des services médicaux. Le prix d'une PMI sera plus ou moins important en fonction de la qualité et de la technicité de ses composants. La prothèse reproduira mieux le fonctionnement de la jambe avec des matériaux spécifiques et des composants très techniques [18].

Le tableau de l'annexe 4 résume les prix normalisés possibles des prothèses classiques que l'on retrouve sur le marché en fonction des composants qui les constituent [16].

De plus le patient doit constamment investir de l'argent pour l'entretien de son équipement prothétique. Il doit adapter son environnement (toilettes, salle de bain, voiture) et les aides techniques en fonction de son handicap [24].

Les prothèses dédiées au sport sont constituées de technologies spécifiques et des matériaux rares tels que la fibre de carbone. Elles donnent accès à de nouvelle fonctionnalité au patient pour la pratique d'activités sportives avec des meilleures performances pour la propulsion du corps.

D'un point de vue financier, le coût d'une prothèse sportive est nettement plus élevé qu'une prothèse de la vie quotidienne car le prix de fabrication est plus conséquent du fait de sa composition de matériaux spécifiques et des technologies pointues.

Le prix élevé des prothèses spécifiques représente un réel problème d'accessibilité chez la globalité des patients. Avant d'acheter des prothèses spécifiques, les patients doivent investir leurs argent dans des coûts d'entretien réguliers de leurs PMI [14].

Ce problème d'accessibilité empêche les patients de pratiquer des activités qui pourraient être positives pour leur bien-être et leur santé.

Pour dépasser ce problème financier, certains utilisateurs font du sport avec leur prothèse du quotidien. Cependant cette pratique, non adaptée pour le patient, entraîne des blessures importantes au niveau du membre résiduel [13].

b) Des fonctionnalités contraignantes

Les PMI redonnent des capacités fonctionnelles aux patients, mais leurs utilisations connaissent diverses complications causées par plusieurs contraintes.

Le corps humain change constamment et le membre résiduel du patient évolue en changeant de forme et de taille selon les activités pratiquées au cours de la journée.

D'un point de vue technique, les composants d'une prothèse n'évoluent pas dans le temps, mais ils se modifient selon les efforts qui s'appliquent sur eux.

La modification régulière du moignon au contact de l'emboiture non modifiable entraîne des défaillances cutanées chez le patient.

L'acclimatation du corps humain à un dispositif technique est difficile et ce souci d'adaptation provoque des fluctuations, des douleurs et des désadaptations chez le patient lors du port de la prothèse [24].

Le patient doit avoir un accompagnement strict et rigoureux car les composants de la prothèse s'usent au cours du temps ce qui occasionne des cassures. Afin de régler ces problèmes techniques, la prothèse doit être réajustée et réparée afin d'éviter des blessures au patient [24].

Les prothèses à usages quotidien sont limitées dans leur usage courant. Elles ne sont pas adaptées aux pratiques d'activités sportives.

Pour le prouver, une équipe scientifique a comparé des prothèses générales et sportives sur leurs adaptations aux réactions du sol.

Les résultats statistiques de cette étude nous signalent que les prothèses générales réagissent bien aux réactions verticales qui correspondent aux actions subies lors de la marche, mais qu'elles s'adaptent mal aux réactions de propulsions qui représentent les actions de la course à pied [13].

Les résultats de cette étude prouvent que les prothèses inférieures du quotidien ne permettent pas la pratique d'activités sportives avec des déplacements importants, car les composants ne sont pas adaptés aux efforts intensifs [13].

Les prothèses du quotidien permettent d'effectuer des activités de loisirs tels que le ping-pong, la randonnée, le bricolage en fonction de la composition des parties de la prothèse générale. Ainsi les patients sont obligés de se doter de prothèses sportives pour pratiquer du sport [21].

Les prothèses sportives ont également des contraintes car elles répondent uniquement à une fonctionnalité précise qui dépend du sport pratiqué. La manipulation de ces prothèses limite le patient dans ses gestes car elles sont construites sur une géométrie particulière permettant l'accès à des mouvements spécifiques [2]. Par exemple, un patient portant une prothèse de course à lame ne pourra pas marcher quotidiennement avec, car elle n'est pas conçue pour les positions fixes et les efforts verticaux de la marche [13].

Ces prothèses sportives sont complexes d'utilisation et elles nécessitent un temps d'adaptation pour le patient.

D – Des pistes de solutions

a) Des mouvements solidaires

Il existe de nombreux moyens mis en place pour aider les patients amputés du membre inférieur à surmonter les limites et les contraintes causées par le port des PMI. Les associations caritatives sont nombreuses en France et dans le monde. Ces associations mettent en place des plans d’actions à différents niveaux et de plusieurs manières pour contribuer à l’assistance des patients.

Des associations comme ADEPA ou Liste-Amp veillent à faire valoir le droit de citoyenneté et l’intégration sociale des personnes amputées dans les activités du quotidien (emploi, sport, loisirs, vie quotidienne). Elles agissent auprès des structures médicales (hôpitaux, cliniques, centres de rééducation), pour assurer des aides psychologiques aux patients et favoriser leur intégration dans la société malgré leur handicap [15].

Les associations de « makers » cherchent à concevoir des prothèses à partir de solutions techniques fiables et optimales telle que l’impression 3D. Cette méthode permet d’améliorer la fonctionnalité de la prothèse avec des articulations et des matériaux légers et résistants. L’objectif de ces associations est de collecter des fonds, et de transmettre des prothèses fiables aux patients à des prix abordables [22].



Figure 5 : PMI conçue en impression 3D

Certaines associations proposent des dons pour soutenir financièrement les personnes n’ayant pas les moyens d’acheter une prothèse. D’autres prêtent ou distribuent des prothèses aux patients pour la pratique d’activités sportives [7].

Ces types d’aides sont souvent dédiés aux enfants pour qu’ils obtiennent des prothèses adaptés à leur corps en fonction de leur âge et de leur croissance.

La présence de la sécurité sociale dépend des politiques des pays. En France, les patients étant dotés d’une sécurité sociale et d’une mutuelle peuvent bénéficier d’une prise en charge importante sur le prix d’achat d’une prothèse, avec des couvertures allant de 80% à 100%.

L’assurance maladie a des conditions sur la prise en charge des prothèses qui dépendent des prothésistes et des instituts médicaux [18].

b) Des recherches scientifiques et techniques

Nous avons vu que l’accessibilité pour obtenir plusieurs prothèses (prothèse du quotidien, prothèses pour des activités spécifiques) reste compliquée car les prix d’achat des prothèses sont très coûteux. Pour remédier à ce problème, certaines PMI sont conçues sur un assemblage de composants techniques pouvant être emboîtés les uns aux autres selon l’activité pratiquée par l’utilisateur.

Par exemple, un patient dispose d’une prothèse du quotidien construit avec une emboiture, un manchon, un genou prothétique, une liaison tubulaire et un pied prothétique.

Si ce patient souhaite faire de la course à pied, il remplace la liaison tubulaire et le pied prothétique par une lame de course, qu’il incère avec le reste des composants (Cfr Annexe 3) [2] [19].

Cette solution technique améliore l'accessibilité des prothèses sportives, car le patient peut se fournir de composants spécifiques (lame de course, pied prothétique spécifique), et de l'ajuster aux restes des composants qu'il détient déjà (emboiture, genou prothétique, manchon) [2] [19].

Les recherches scientifiques sont également tournées vers l'amélioration des dispositifs prothétiques afin de réduire au maximum les contraintes des problèmes techniques et des problèmes d'intégration du membre résiduel avec le système prothétique.

Il existe de nombreuses recherches qui se tournent sur des solutions innovantes avec la fabrication de composants de prothèses et des systèmes capables d'améliorer le port de la prothèse pour le quotidien du patient.

C'est le cas d'un projet scientifique tiré du livre « Gait and posture », où l'objectif de la recherche est d'améliorer l'adaptation du membre résiduel à la PMI, grâce à une emboiture et un manchon qui s'acclimateront à l'évolution du moignon. Comparé aux emboitures classiques, ce dispositif s'acclimaterait à l'évolution du moignon au cours de la journée afin de garantir un meilleur confort au patient [25].

Certaines études de recherches et de développement cherchent à remettre l'homme au centre de la conception de la PMI.

L'un des articles de recherche tiré du livre « Robotics and Autonomous System » nous montre que le groupe de chercheurs a décidé d'orienter la conception d'une PMI en comparant et en classifiant les facteurs humains et les facteurs techniques de la prothèse, en fonction des avis de patients et d'experts technique. Etant donné que les points de vue dépendent de chacun, cette étude dévoile la possibilité d'atteindre une multitude de conception de prothèses en privilégiant les besoins des patients tout en conservant les facteurs techniques prioritaires [1].

Certaines études sont orientées vers la planification de nouveaux procédés capables d'améliorer la conception d'une prothèse à partir de techniques numériques. La mise en place de scannage en 3D a pour but de modéliser le membre résiduel du patient et de comprendre son évolution en fonction du temps [8].

Du fait des grandes concurrences entre les différentes entreprises prothésiste, il est compliqué de trouver des sources décrivant les nouvelles évolutions techniques des PMI.

Il existe énormément de recherches scientifiques qui sont orientées vers des solutions et des améliorations des prothèses, afin de les rapprocher du fonctionnement naturel des membres inférieurs de l'homme.

« Les progrès de la science liés à la médecine font des bonds de géants », cette citation, tirée de Technique de l'ingénieur, nous permet de penser que les améliorations technologiques ont énormément évoluées et continueront d'évoluer dans le temps. Ainsi, les avancées techniques permettront une facilité d'accès aux prothèses élaborées techniquement [12].

III - Action mise en place

A – Présentation de l'action

Lors de ce travail de recherche, j'ai été confronté à de nombreux sites et articles provenant de nombreuses sources et j'ai récupéré de nombreuses informations sur les PMI.



Figure 6 : Logo entreprise Orthofiga

J'ai eu l'idée de mettre en place une action en contactant un prothésiste professionnel. Cela me permet de mieux comprendre le domaine des prothèses, d'obtenir des renseignements fiables et de vérifier les informations que j'ai recueillies. Cette interview est importante pour analyser et pour répondre à la problématique.

J'ai contacté différentes entreprises prothésistes françaises telles qu'Orthofiga, OPR, Proteor pour entrer en contact avec des prothésistes et leur poser des questions sur le thème des PMI.

Par chance, Monsieur BOISORIEUX, prothésiste au sein de l'entreprise Orthofiga, m'a contacté et a accepté de répondre à mes questions lors d'un entretien téléphonique.

B – Mise en œuvre de l'action

Tout d'abord, j'ai orienté mes questions sur la présentation et le fonctionnement de l'entreprise Orthofiga.

Cette entreprise privée intervient partout en Bretagne et elle est spécialisée dans la conception d'emboiture.

Monsieur BOISORIEUX m'a précisé que les méthodes de travail sont propres à chaque entreprise prothésiste. De plus les entreprises prothésistes sont les seuls établissements médicaux à concevoir et à fabriquer des prothèses en France.

L'entreprise Orthofiga est constituée d'applicateurs (prothésistes) et de techniciens pour la fabrication des prothèses.

Les applicateurs prennent en charge le patient pour comprendre les besoins et adapter la conception de la prothèse. Ils effectuent le moulage du moignon et ils accompagnent le patient lors de l'essai de la prothèse. Les techniciens ont pour rôle de fabriquer les emboitures.

Les prothésistes se déplacent dans les centres de rééducation pour rencontrer accompagner des patients et poser des prothèses.

La fabrication d'une PMI au sein d'Orthofiga se déroule en deux parties. Tout d'abord, les prothésistes conçoivent eux-mêmes l'emboiture qui est adaptée au membre résiduel du patient. Les prothésistes commandent les autres composants de la prothèse chez des fournisseurs afin d'avoir les composants spécifiques à la demande et au besoin du client. Les prothésistes effectuent l'assemblage de la prothèse une fois que les composants sont reçus.

Les étapes de la distribution d'une prothèse restent similaires aux autres entreprises.

Ensuite, nous avons échangé sur le prix des prothèses et des solutions existantes pour les rendre plus accessibles aux patients.

En France, la sécurité sociale est dédiée aux grands appareillages, et elle prend en charge 100% des frais de la prothèse sous condition que le patient détienne une assurance maladie.

La prise en charge dépend des composants et de la spécialité des PMI. Par exemple, une prothèse comprenant un genou équipé d'un microprocesseur à un prix très élevé ne sera pas prise en charge

par la sécurité sociale. De plus, les prothèses sportives ne sont pas remboursables car il existe de trop nombreux facteurs instables (évolution du moignon, évolution du patient avec une croissance selon l'âge).

L'évolution constante de ces facteurs rend l'adaptation de la prothèse complexe et régulière pour les patients.

Malgré le manque d'accessibilité des PMI, il existe de nombreuses associations qui aident les patients, dont certaines qui s'associent à des entreprises comme Orthofiga.

Monsieur BOISORIEUX déclare que l'achat de prothèses spécifiques (prothèses de sports) reste plus compliqué pour les adultes car ils n'ont pas d'aides financières pour se fournir d'une telle prothèse.

Puis j'ai orienté mes questions sur le rapport entre les patients et le sport.

Monsieur BOISORIEUX m'a précisé que, de manière générale, les patients souhaitent exercer une pratique sportive après quelques temps (voire plusieurs années) d'adaptation de la prothèse du quotidien selon l'évolution et la douleur du moignon.

Mais la pratique du sport et le port de prothèses sportives dépendent du profil du patient.

Les patients qui pratiquent du sport représentent 5% des clients de l'entreprise Orthofiga. Habités à faire de l'exercice, ils ont besoin de continuer les activités physiques malgré le handicap.

La majorité des autres clients est plus âgée et le besoin de faire du sport semble décliner dans les tranches d'âges à partir de 50 ans.

Les pratiques d'activités sportives pour les patients n'ont pas de limites mais plutôt des inconvénients. Le patient peut trop solliciter son moignon lors de l'activité provoquant des douleurs, des blessures ainsi que des problèmes techniques sur la prothèse.

D'après Monsieur BOISORIEUX, l'inconvénient des prothèses sportives est le prix élevé pour une utilisation rare et très spécifique.

Enfin, j'ai orienté mes questions vers les problèmes des prothèses auprès des patients.

Monsieur BOISORIEUX m'a affirmé que le souci le plus fréquent chez les patients est l'évolution et les pertes de volumes du membre résiduel des patients.

Ce changement fréquent des moignons représente un problème car le dispositif de l'emboiture reste fixe. Cela entraîne une réadaptation fréquente de l'emboiture avec la mise en place de moulure du moignon.

Cet obstacle peut devenir grave pour le patient si celui-ci ne s'en rend pas compte, car il peut se blesser au niveau du membre résiduel.

Le problème d'évolution du moignon en fonction de l'emboiture est l'enjeu majeur à améliorer pour aider les patients à mieux s'adapter à leur prothèse.

De l'avis de Monsieur BOISORIEUX, des prothésistes et des patients, l'emboiture est le composant majeur à retravailler pour améliorer la prothèse et la rendre plus confortable.

Il existe des solutions techniques qui permettent d'améliorer l'usage de la prothèse inférieure pour les patients.

Tout d'abord, il existe des composants très techniques qui améliorent les mouvements des patients tels que des genoux microprocesseurs, des pieds électroniques (La régulation de la marche et la sécurité des phases d'appuis sont garantis grâce à ces composants).

D'après Monsieur BOISORIEUX, ces composants sont très chers sur le marché, même si certains composants de ce type sont utilisés car ils sont remboursés par la sécurité sociale.

Ensuite, il y a des recherches sur la mise en place de techniques pour aider et faciliter la conception des prothèses.

Par exemple, des scans en 3D se développent. Ces scans 3D scannent et modélisent les moignons des patients pour la réalisation des emboitures et suivre l'évolution du membre résiduel au fil du temps. Cette technique permet de concevoir des emboitures plus précises et mieux adaptables à l'évolution du moignon.

C – Résultats et discussion

A travers cet entretien avec Monsieur BOISORIEUX, nous remarquons que le pourcentage de patients qui se fournissent de prothèses sportives est très faible, correspondant à 5% de la totalité des clients.

D'après Monsieur BOISORIEUX, une grande partie des clients d'Orthofiga a un âge supérieur à la cinquantaine. Ces patients souhaitent seulement avoir une PMI qui leur permet de marcher continuellement et qui leur apporte un confort quotidien.

A travers cette interview, nous nous rendons compte que l'idée d'une prothèse multifonctionnelle n'est pas utile pour cette partie de la population. De plus, l'idée d'accessibilité est atteinte car ces personnes âgées peuvent disposer d'une PMI avec un remboursement (allant de 80% à 100%), ce qui ne représente pas une limite à l'accès de prothèses quotidiennes.

Ainsi, Monsieur BOISORIEUX m'a indiqué que l'enjeu actuel chez les prothésistes, correspond à l'amélioration des emboitures pour apporter aux patients un meilleur confort. Les emboitures doivent s'adapter à l'évolution du membre résiduel afin de garantir une sécurité dans le temps pour le patient.

La mise en place d'un sondage auprès de patients handicapés aurait pu être bénéfique pour ce projet. Cette action aurait permis de récupérer les avis des patients pour comprendre leur ressenti sur le port d'une PMI, les enjeux majeurs des PMI à améliorer et savoir si une PMI multifonctionnelle et accessible serait utile pour l'amélioration de leur quotidien et de leur handicap.

IV - Synthèses d'articles scientifiques

Article 1 : « A human-machine centered design method for lower limb prosthetics »

- **Auteur :** P.Beckerle, O.Christ, T.Schürmann, J.Vogt, O.von Stryk et S.Rinderknecht
- **Journal :** Volume 95 du livre « Robotic and Autonomous Systems »
- **Editeur :** ScienceDirect
- **Année :** 2017

L'objectif de cette recherche est de mettre en place une nouvelle méthode de conception de dispositifs robotiques utilisés par l'homme, à partir d'une approche centrée sur les rapports entre homme et machine. Cet article de recherche étudie une nouvelle méthode de conception orientée sur les systèmes de PMI équipés de genoux motorisés (PMIGM). Cette méthode de conception doit répondre aux besoins des patients en reliant réciproquement les facteurs techniques et psychologiques. Les chercheurs ont récolté des bases de données pour identifier les principaux critères de ces facteurs.

Les chercheurs ont utilisé 22 publications scientifiques pour extraire et classer par groupe les facteurs techniques principaux pour la conception de PMI qui sont : La mécanique/cinématique (MEC), l'actionneur/groupe motopropulseur (ACT), les capteurs (SEN), les commande niveau inférieur (CON), la marche/la reconnaissance de l'état (GPR), le poids (WEI), la taille/volume (SIZ), le temps de fonctionnement (OPT), la fonctionnalité (FUN).

Pour déterminer les facteurs humains, les chercheurs ont conçus trois questionnaires (concernant le port des prothèses inférieures, tibiales et fémorales) qui sont répondus par des patients expérimentés. Les questions portent sur les sensations et les fonctionnements des prothèses par les utilisateurs. Les réponses aux questionnaires sont tirées de modèles et d'indications sur les facteurs humains, et ces éléments de réponses sont sous forme d'échelle décrite verbalement.

Les facteurs humains sont : la satisfaction (SAT), le sentiment de sécurité (FOS), l'intégration des schémas corporels (BSI), le soutien (SUP), la prise (SOC), la mobilité (MOB), l'apparence extérieur (APP).

La conception de la PMIGM s'est jouée en plusieurs étapes.

Tout d'abord, l'utilisation de la méthode QFD détermine l'axe de développement de la prothèse en fonction des interrelations des facteurs humains et techniques. Ces interrelations se font dans des matrices d'évaluation qui déterminent quels sont les facteurs techniques qui répondent au mieux aux principaux facteurs humains sur le port de PMIGM.

Une seconde étude nommée « Comparaison par paire » permet de comparer les facteurs techniques par paire pour classer les facteurs techniques les plus importants pour le fonctionnement de la PMIGM. Ensuite, les chercheurs ont procédé à l'ingénierie du système en composant l'intégration géométrique et fonctionnelle de la prothèse à partir des interrelations des facteurs.

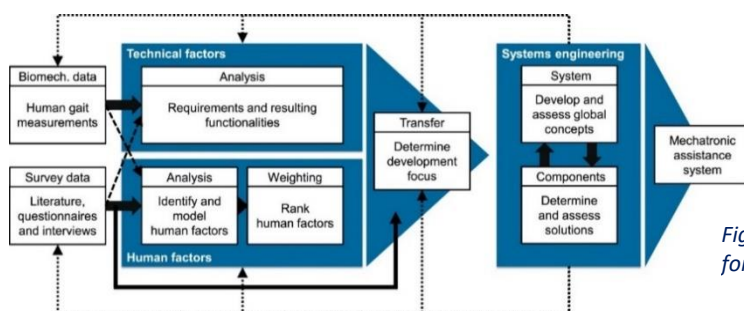


Figure 7 : Déroulement de la conception de la PMI en fonction des facteurs humains et techniques

Le QFD nous rend compte que le soutien, la mobilité et l'intégration au schéma corporel représentent les facteurs humains auxquels répondent les exigences techniques suivantes.

La planification de marche, l'actionnement/transmission, la mécanique/cinétique et le temps de fonctionnements sont les principales exigences techniques sur lesquelles les prothèses motorisées doivent s'appuyer. Ce sont les principaux critères donnés à la PMIGM car ils apportent la mécanique de marche, une augmentation de la mobilité et de l'autonomie au patient, tandis que les facteurs techniques correspondant aux poids, volume, taille et capteurs présentent des exigences techniques moins importantes au besoin des facteurs humains.

La « comparaison par paire » qui confronte les facteurs techniques, dévoile des résultats étonnants. Ils montrent que les besoins de la prothèse s'orientent vers la partie technique du genou motorisé plutôt que la mécanique/cinétique de la prothèse. Cette tendance est due au genou motorisé qui apporte des avantages au patient sur l'assistance des mouvements. Les facteurs techniques du poids et de la fonctionnalité sont les premières exigences techniques que doit répondre la prothèse, alors que les facteurs de la mécanique/cinétique, actionnement et durée de fonctionnement ne sont pas priorités.

En comparant les résultats des deux méthodes, nous remarquons que la priorisation des exigences techniques des PMIGM se joue sur les points de vue des facteurs référents.

Une PMIGM qui répond aux facteurs humains ne sera pas construite techniquement de la même manière qu'une PMIGM qui répond aux besoins des facteurs techniques.

La divergence des résultats peut être due aux influences des acteurs lors du processus de cette étude. L'avis des experts concernant leur approche de la technique et de la mécanique des PMIGM peut différer de l'avis des patients, au vu de leur expérience personnelle et de leur usage quotidien de la prothèse.

La volonté de cette étude à vouloir placer l'homme au cœur de la conception de PMIGM reste limité d'un certain point de vue.

L'étude n'a pas pris en compte l'aspect social de l'homme, mais seulement l'adaptation du patient sur le fonctionnement de la prothèse.

Nous avons vu dans l'état de l'art que le prix des composants techniques tel que le genou motorisé, augmente considérablement le prix de la prothèse ce qui représente un frein dans l'accessibilité.

Ce facteur humain aurait pu fortement modifier les résultats de l'aspect technique et du choix de la technologie employée lors de la conception de la PMIGM.

A travers cet article de recherche, nous découvrons une nouvelle méthode de conception dont l'objectif est d'égaliser les facteurs humains et techniques autour de la création de PMI constitué d'un genou motorisé.

Cette conception peut s'effectuer sur d'autres parties de la prothèse telles que le pied, les liaisons tubulaires, les chevilles.

Ainsi, la fluctuation des exigences techniques en fonction des composants de la PMI et des critères spécifiques aux besoins du patient pourrait conduire à des décisions d'ingénieries variées dans l'orientation de la conception des PMI.

Ces nombreuses interrelations entre les facteurs techniques et humains pourraient donner des idées et des nouveaux besoins qui n'ont pas encore été répondu jusque-là par les prothèses actuelles. Elles permettraient de nombreuses évolutions sur la technologie prothétique.

B - « Adaptive Sports Technology and Biomechanics : Prosthetics »

- **Auteur : Arthur Jason De Luigi, Rory A Cooper**
- **Journal : Volume 6 du livre « PM&R »**
- **Editeur : Stuart E. Willick**
- **Année : 2014**

L'objectif de cet article est de décrire l'existence et les progrès de la technologie et de la biomécanique des prothèses sportives de membres inférieurs, ainsi que les bienfaits du sport afin d'inciter les personnes portant des PMI à pratiquer des activités sportives.

Dans un premier temps, l'étude nous montre que la pratique d'handisport est en augmentation depuis quelques années grâce aux évolutions techniques. Cependant la pratique d'handisport reste freinée par un manque de sensibilisation et un problème d'accès aux possibilités de pratiques sportives.

La pratique d'activités sportives transmet aux athlètes handicapés des avantages physiques (une grande force musculaire, une bonne résistance cardiovasculaire, une meilleure capacité motrice) et des avantages psychologiques (une meilleure image de soi, une conscience du corps, un bon caractère) apportant un équilibre et une bonne santé chez les patients.

Le port de la prothèse ne permet pas la récupération des fonctionnalités de la jambe. Cependant un bon équipement bien adapté au membre résiduel et une rééducation efficace permettent aux patients d'améliorer les capacités pour la pratique d'activité sportive.

Les prothèses du quotidien permettent la pratique d'activités variées et à différentes intensités, avec des choix judicieux sur la construction des composants de la prothèse. Pour pouvoir pratiquer une activité sportive spécifique, le patient doit d'abord être en bonne maîtrise de la prothèse générale et il doit s'engager pour effectuer des entraînements réguliers pour le sport concerné avec la prothèse sportive spécifique. Par manque de moyen financier, une solution possible est d'adapter différentes combinaisons de prothèses à partir des composants de base comme l'emboiture.

Comparé aux prothèses générales, les caractéristiques fonctionnelles des composants de la prothèse sportive correspondent à des critères spécifiques qui répondent aux exigences fonctionnelles et biomécaniques du sport concerné.

Les constitutions des prothèses sportives ne sont pas universelles, car elles sont basées sur la conception d'éléments en sur mesure selon la géométrie de la prothèse sportive en fonction de l'alignement, de la dynamique du pied prothétique, de l'absorption des chocs et du besoin de rotation pour les parties articulées.

L'alignement de l'emboiture et des liaisons tubulaires améliorent le confort et les performances dynamiques du patient car la charge de l'impact est transférée du pied vers le membre résiduel.

La composition des prothèses sportives est spéciale car l'alignement répond à la pratique du sport et elle ne permet pas une marche naturelle comme le permet la prothèse du quotidien.

Lors d'activités sportives, les patients subissent de nombreuses forces multidirectionnelles qui causent des pressions et des contraintes de cisaillements. Le choix des composants tels que les pieds prothétiques, des pylônes d'absorptions, l'emboiture, les articulations peut être bénéfique pour le patient afin d'améliorer le port la prothèse sportive et de diminuer les problèmes qui s'appliquent sur le membre résiduel.

Les nombreuses compositions des prothèses sportives permettent la pratique de nombreux sports basés sur des compositions techniques particulières. La géométrie d'un sport évolue selon le type d'amputation. Pour les prothèses sportives fémorales, elles pourront être dotées d'articulation supplémentaire selon le besoin.

Les prothèses de courses disposent de plusieurs types de lame de course selon les besoins de courses. La géométrie de la lame donne des bonnes qualités d'absorption aux chocs et elle augmente le stockage et le retour d'énergie ce qui apporte un mouvement naturel au patient.

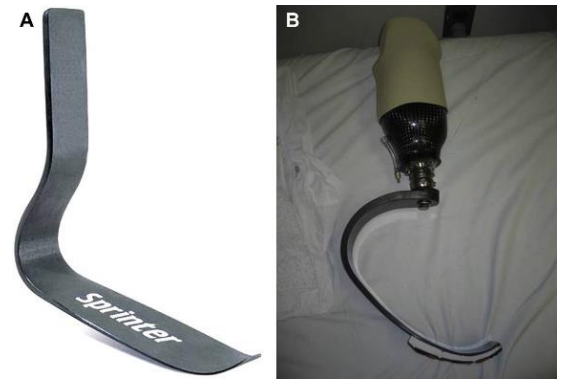


Figure 8 : Différentes géométries de lames de course

Les prothèses de cyclisme s'adaptent à l'équipement du vélo avec un dispositif terminal fixé sur la douille de la prothèse et qui se clips sur la pédale.

La prothèse de golf ressemble à une prothèse générale mais elles sont composées d'adaptateurs de couple et de rotation afin d'effectuer des mouvements triplanaires et d'améliorer les rotations des articulations de la hanche, et de la cheville.

Les prothèses d'escalade disposent d'un dispositif terminal spécialisé avec des pieds d'escalade profilés qui permettent une meilleure adhérence au mur. Elles sont ajustées à des longueurs différentes selon les ascensions et les besoins du grimpeur.

Les prothèses de ski ont de nombreuses options d'équipements. Elles doivent avoir un alignement bien particulier pour créer un membre inférieur fléchi pour donner une position athlétique. Ces prothèses ont des parties terminales à base de pied prothétique qui se fixe au ski et des amortisseurs. Cette fixation permet de diminuer le poids du patient et d'améliorer le transfert d'énergie vers l'équipement sportif.

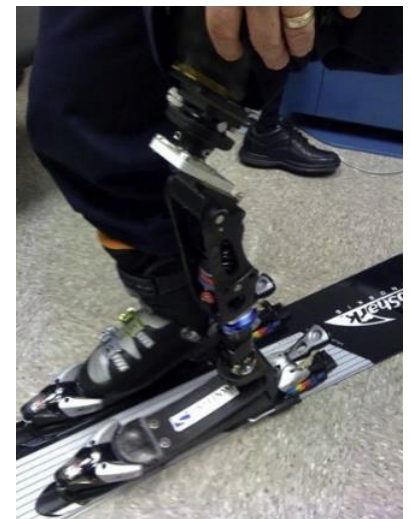


Figure 9 : Prothèse de ski accrochée au ski

Il existe d'autres types de sports de glisse comme le ski assis, le snowboard, le surf avec des géométries bien spécifiques.

Cet article de recherche présente bien l'existence de nombreuses prothèses sportives et prouve que la pratique sportive est possible pour chaque personne muni d'une PMI. Cependant, l'article ne précise pas les limites des accès à ces prothèses sportives à part des contraintes physiques vécues par certains patients.

Cette étude nous permet de constater que la technologie et la biomécanique ont fortement évolué permettant de concevoir des prothèses sportives de hautes qualités. L'évolution des techniques des prothèses sportives permet de réaliser des mouvements se rapprochant au mieux des articulations des membres inférieurs, facilitant la pratique sportive chez les patients.

Grâce à ces technologies, les prothèses sportives permettent aux patients de pratiquer de nombreux sports non accessibles avec une prothèse générale, et de retrouver des sensations de libertés aux membres perdus.

L'idée d'universaliser des prothèses sportives n'existe pas car elle est freinée par la complexité de l'adaptabilité du dispositif en fonction de son utilisateur. Les prothèses ne sont jamais identiques car elles s'adaptent à la morphologie et aux besoins du patient.

C - « Joint work and ground reaction forces during running with daily-use and running specific prostheses »

- **Auteur : Lauren A. Sepp, Brian S. Baum, Erika Nelson-Wrong, Anne K. Silverman**
- **Journal : Volume 101 du livre « Journal of Biomechanics »**
- **Editeur : ScienceDirect**
- **Année : 2020**

Il existe des patients qui utilisent leur prothèse du quotidien pour pratiquer du running car ils n'ont pas les moyens de se fournir de prothèses spécifiques à la course.

L'objectif de cette étude est de comparer l'évolution mécanique des prothèses de course aux prothèses à usage courant lorsqu'elles subissent des efforts lors de la course.

De plus, l'étude présente une volonté de faire comprendre comment l'amputation, le choix de l'appareil et la vitesse de course affectent les résultats biomécaniques pour les patients lors d'activité physique.

Les chercheurs ont mis en place une expérience pour comparer les deux types de prothèses aux efforts de courses. Ils ont eu le volontariat de 26 patients dont 13 d'entre eux ont subi une amputation trans-tibiale. Les patients amputés sont expérimentés avec leurs matériels et ils utilisent leurs prothèses à usage quotidien et de course pour suivre le protocole de l'expérience.

Lors de l'expérience, les patients ont couru sur des courtes séquences à différentes allures allant de 2.5 m/s à 5m/s. L'analyse a été construite sur cinq cycles par allure pour chaque participant. Peu de patients n'ont pas su remplir toutes les conditions du protocole.

Les chercheurs ont positionné des marqueurs actifs et des capteurs de mouvement optoélectronique sur les différents partis des jambes et des prothèses afin de collecter les mouvements des patients lors de la course. L'expérience étudie chaque partie de la mécanique des jambes et des prothèses afin de les comparer aux forces de réactions au sol qui s'appliquent sur elles lors de la course.

Pour ne pas créer de limite, toutes les prothèses ont été analysées de la même manière en prenant en compte les caractéristiques des dispositifs tels que la valeur du centre de masse, les propriétés d'inertie et le travail d'articulation de la cheville. Les forces de réactions au sol ont été normalisées par rapport au poids du corps, et le travail articulaire a été normalisé par rapport à la masse corporelle.

Les chercheurs ont analysé et évalué les données sur le logiciel statistique R à partir de trois facteurs ANOVA qui sont la vitesse de course à cinq niveaux (cinq allures allant de 2,5m/s à 5m/s), le côté de la prothèse a deux niveaux (intact, amputé) et l'état de la prothèse a deux niveaux (prothèse général, prothèse de course). Les chercheurs ont utilisé la correction de Tukey pour effectuer des comparaisons multiples, et des comparaisons par paire lorsque des interactions significatives étaient constatées.

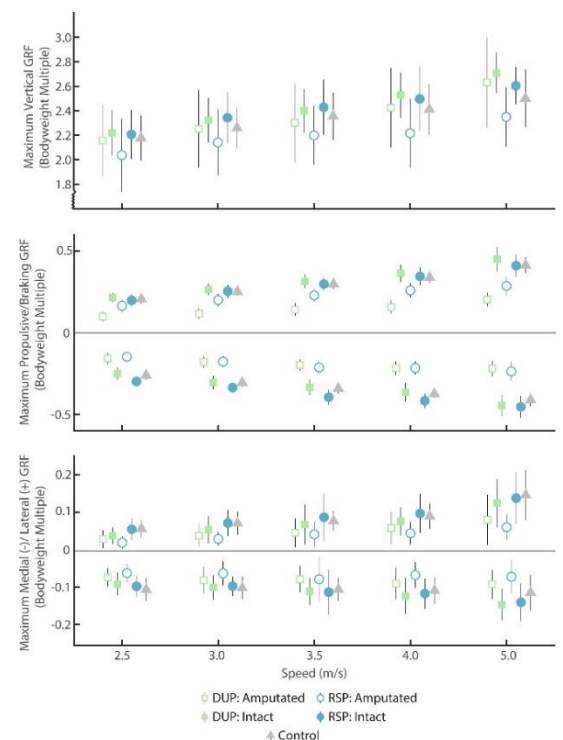


Figure 10 : Diagrammes des réactions du sol en fonction du type de prothèses et de l'allure de course

La figure 3 nous rend compte que les différentes prothèses et les jambes ne réagissent pas de la même façon aux forces de réaction du sol. Dans le cas **des réactions verticales**, nous remarquons que les PC ont une réaction verticale plus faible que les PG, sachant que celles-ci ont des réactions qui se rapproche des jambes intactes.

Nous observons que les PC présentent des comportements équivalents aux jambes intactes sur les **réactions propulsives**, alors que les PG ont des réactions propulsives plus faibles. Cependant les deux types de prothèses réagissent similairement **aux forces de freinages**, car leurs forces d'absorption sont nettement plus faibles comparées à celles des jambes intactes.

Les réactions médianes et latérales montrent que les réactions des différentes prothèses suivent l'allure des jambes intactes, mais elles restent inférieures.

Nous remarquons que les PG ont des réactions médianes et latérales plus importantes que les PC.

Ensuite, l'analyse de la figure 4 nous montre le degré de travail du aux efforts de la course qui s'appliquent sur les articulations des membres inférieurs (hanche, le genou et la cheville).

Concernant **le travail de la hanche**, les personnes dotées de PG forcent plus rapidement sur leur hanche que les patients courant avec des PC ou avec leurs jambes intactes.

Nous remarquons que **le travail du genou** reste très faible du côté des deux types comparés aux jambes intactes, malgré l'augmentation de la vitesse de course. Le travail du genou des PG est supérieur aux PC.

Le travail de l'articulation des chevilles est moins important pour les prothèses que pour les jambes intactes sur toutes les allures. Les PC présentent un travail de la cheville plus important que les PG, et qui se rapproche de celui des jambes.

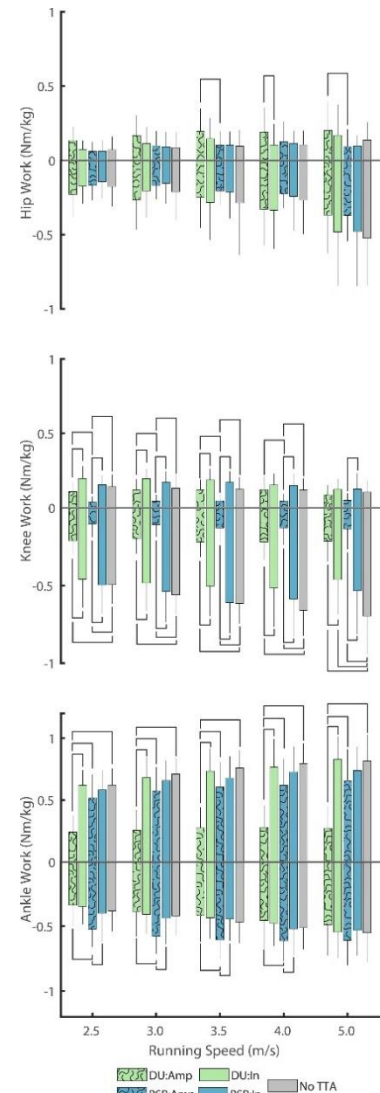


Figure 11 : Boîte à moustache de la réaction des différentes articulations de la jambe et des prothèses en fonction des facteurs ANOVA

Il est important de prendre du recul sur les résultats de cette expérience car certaines mesures ont pu être faussées par différentes causes. Certains patients n'ont pas pu répondre à toutes les exigences du protocole. Les PG des patients ne disposaient pas des mêmes compositions techniques car elles sont toutes conçues sur mesure, provoquant des réactions différentes entre les composants des PG. Les résultats de cette expérience nous prouvent que les différents types de prothèses ne réagissent pas de la même manière aux réactions du sol selon leur construction géométrique et mécanique.

Cette étude nous montre que la pratique d'activités sportives s'effectue seulement avec des PC. Pour la pratique de course à pied, la géométrie des lames de courses améliore le confort des patients en réduisant le travail des hanches, et elle dynamise les réponses mécaniques afin de stocker et retourner l'énergie pour la propulsion du coureur. Cependant les PC n'ont pas de bons équilibres pour la marche causée par des réactions médianes et latérales faibles.

Les PG ne sont pas conçues pour effectuer de la course et des activités avec de fortes impulsions et absorptions d'énergie car les géométries ne sont pas adaptées et ces efforts peuvent blesser les patients. Cependant la composition des PG équilibre la posture du patient et donne un meilleur soutien grâce aux réactions verticales, médianes et latérales.

V – Conclusion

A – Conclusion de la problématique

La problématique de ce travail de recherche scientifique était de comprendre s'il est actuellement possible de concevoir une prothèse de membre inférieur multifonctionnelle, permettant au patient de réaliser un très grand nombre d'activités quotidiennes, de loisirs et sportives à partir d'une seule prothèse.

Nous avons énormément appris sur le domaine des PMI concernant leur constitution, leur environnement, leur conception et les contraintes existantes. Nous avons observé l'existence de nombreuses catégories de prothèses, qui sont construites et conçues sur mesure en fonction des besoins des patients.

L'entretien avec Monsieur BOISORIEUX, ainsi que les études des articles scientifiques, nous montrent que les prothèses du quotidien ne permettent pas aux patients de pratiquer des activités à fort impact, entraînant des blessures et des problèmes de matériels.

Une prothèse du quotidien permet au patient de marcher, de s'asseoir, de monter les escaliers et même d'exercer certains appuis dans des sports sans mouvements intensifs. Cela représente une forte avancée, mais elle n'autorise pas la pratique des activités à fortes mobilités comme le permettent les équipements spécialisés tel que la lame de course.

Ces activités orientées sont possibles à l'aide de prothèses sportives. Ces prothèses spécifiques ne disposent pas de la même construction géométrique, du même alignement et des mêmes compositions que les prothèses du quotidien.

Actuellement, chaque PMI ne permet pas de répondre au besoin de multifonctionnalité comme le pourrait être une jambe. Chaque PMI répond à une fonctionnalité, et trouve ses limites dans son utilisation selon les situations.

L'idée de la multifonctionnalité de la prothèse peut être atteinte par un assemblage de divers composants en fonction des situations, ce qui permet au patient d'adapter son matériel à l'activité pratiquée.

Mais la conception technique actuelle des PMI ne permet pas de créer une prothèse capable de réaliser n'importe quels mouvements. Il peut exister des prototypes de PMI capables de réaliser plusieurs fonctions mais elles ne sont pas accessibles pour chaque patient (causée par des prix trop importants).

En réponse à la problématique, l'idée d'universaliser d'une PMI capable d'effectuer n'importe quelle activité n'existe pas car la technicité des prothèses ne permettent pas de combiner différents types de mouvements. Suivant l'évolution de la technologie, il est probable que la conception d'une prothèse multifonctionnelle soit possible. Cependant, la technologie employée serait très technique et chère. Ainsi une telle PMI multifonctionnelle ne serait pas accessible pour la globalité des patients due à des prix trop importants.

L'émancipation des technologies des impressions 3D pourraient être une future solution permettant d'améliorer les PMI tout en les rendant facilement accessibles pour les patients.

Au cours des recherches sur le domaine des PMI et avec l'entretien de Monsieur BOISORIEUX, nous nous sommes aperçus que la conception d'une prothèse générale multifonctionnelle et accessible n'est pas l'enjeu majeur pour les patients.

Nous avons observé au cours de nos recherches que 75 % de la population handicapé portant une prothèse à un âge supérieur à 54 ans. Ces chiffres sont dus à des causes d'amputation qui touchent majoritairement les personnes plus âgées.

D'après Monsieur BOISORIEUX et les chiffres ci-dessus, l'enjeu principal des PMI est l'amélioration de la conception des emboitures pour les rendre évolutives et adaptables aux contraintes liées à l'évolution constante du membre résiduel.

La conception et l'amélioration d'une emboiture adaptable serait donc l'enjeu le plus important pour les patients.

B – Conclusion personnelle sur le travail de recherche

Ce travail d'initiation à la recherche scientifique a été bénéfique pour mes compétences personnelles.

J'ai pris beaucoup de plaisir à travailler sur cette problématique et sur ce dossier car j'ai pu approfondir mes connaissances sur le sujet des prothèses de membre inférieur. J'ai trouvé très intéressant et motivant de travailler sur un domaine qui m'a plu même s'il s'est éloigné de mon souhait initial de travailler sur un thème lié au sport.

Ce travail m'a permis d'apprendre à manipuler et construire une veille bibliographique, et de maîtriser les outils et les méthodes de recherches. J'ai suivi les cours de « recherche documentaire » disponible sur Coursera, et cela m'a été fortement utile pour la rédaction et la mise en place de mes travaux.

J'ai par ailleurs, analysé de nombreux articles scientifiques en anglais ce qui était enrichissant pour comprendre les démarches et les structures des articles de recherches. J'ai aussi eu l'occasion de chercher mes informations sur d'autres sources vidéo, articles internet, sites.

Ce travail m'a également permis d'apprendre à prendre du recul sur mes analyses, et la gestion de mes informations afin de produire une rédaction synthétique. Personnellement, la partie synthèse d'information a été la partie la plus compliquée de ce travail, mais j'ai su gérer cette difficulté.

VI - Bibliographie

- [1] P. Beckerle, O. Christ, T. Schürmann, J. Vogt, O. von Stryk, et S. Rinderknecht, « A human-machine-centered design method for (powered) lower limb prosthetics », *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 95, p. 1-12, sept. 2017, doi: 10.1016/j.robot.2017.05.004.
- [2] A. J. De Luigi et R. A. Cooper, « Adaptive Sports Technology and Biomechanics: Prosthetics », *PM&R*, vol. 6, n° 8, Supplement, p. S40-S57, août 2014, doi: 10.1016/j.pmrj.2014.06.011.
- [3] « Agrégation externe SII - 2014 - Option : sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique - Épreuve de modélisation - éducol STI ». https://eduscol.education.fr/sti/concours_examens/agregation-externe-sii-2014-option-sciences-industrielles-de-lingenieur-et-2#description (consulté le juill. 25, 2020).
- [4] « AP7Amputees_Jambe.pdf ». Consulté le: juill. 25, 2020. [En ligne]. Disponible sur: http://ancien.cofemer.fr/UserFiles/File/AP7Amputees_Jambe.pdf.
- [5] C. Sauret, J. Bascou, et H. Pillet, « Biomécanique du handicap et de la réhabilitation », p. 21.
- [6] *C'est pas sorcier -Les prothèses : comment ça marche ?*
- [7] « Challenged Athletes Foundation (CAF) Distributes a Record-breaking 3,921 Individual Grants », *Benzinga*. <https://www.benzinga.com/pressreleases/20/03/g15682424/challenged-athletes-foundation-caf-distributes-a-record-breaking-3-921-individual-grants> (consulté le mai 04, 2020).
- [8] D. Regazzoni, A. Vitali, C. Rizzi, et G. Colombo, « Chapter 57 - A virtual platform for lower limb prosthesis design and assessment », in *DHM and Posturography*, S. Scataglini et G. Paul, Éd. Academic Press, 2019, p. 733-746.
- [9] É. Larousse, « Définitions : prothèse - Dictionnaire de français Larousse ». <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/proth%C3%A8se/64561> (consulté le juill. 25, 2020).
- [10] D. Pailler, P. Sautreuil, J.-B. Piera, M. Genty, et H. Goujon, « Évolution des prothèses des sprinters amputés de membre inférieur », *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*, vol. 47, n° 6, p. 374-381, août 2004, doi: 10.1016/j.annrmp.2004.05.007.
- [11] « GROUD_Colloque_Expairs.pdf ». Consulté le: juill. 25, 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://expairsenjeux.sciencesconf.org/data/pages/GROUD_Colloque_Expairs.pdf.
- [12] yaya, « Implants, prothèses, organes artificiels... jusqu'où réparer le corps ? », *Techniques de l'Ingénieur*. <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/implants-protheses-organes-artificiels-jusquou-reparer-le-corps-32737/> (consulté le juill. 25, 2020).
- [13] L. A. Sepp, B. S. Baum, E. Nelson-Wong, et A. K. Silverman, « Joint work and ground reaction forces during running with daily-use and running-specific prostheses », *Journal of Biomechanics*, vol. 101, p. 109629, mars 2020, doi: 10.1016/j.jbiomech.2020.109629.
- [14] « Le handicap et ses limites - Le sport pour les handicapés ». <https://sites.google.com/site/sportous1s3/des-bienfaits-malgre-des-limites-1/le-handicap-et-ses-limites> (consulté le juill. 25, 2020).

- [15] « Les causes d'amputation | ADEPA ». <https://www.adepa.fr/autour-de-lamputation/les-causes-damputation/> (consulté le juill. 25, 2020).
- [16] « lpp_orthos11012018.pdf ». Consulté le: juill. 25, 2020. [En ligne]. Disponible sur: http://ampan.free.fr/2018/lpp_orthos11012018.pdf.
- [17] « Options des prothèses de membres - Sujets particuliers », *Manuels MSD pour le grand public*. <https://www.merckmanuals.com/fr-ca/accueil/sujets-particuliers/proth%C3%A8ses-de-membres/options-des-proth%C3%A8ses-de-membres> (consulté le juill. 25, 2020).
- [18] « Prix prothèse : tarifs des différentes prothèses - Ooreka », *Ooreka.fr*. <http://prothese.ooreka.fr/comprendre/prix-prothese> (consulté le mai 11, 2020).
- [19] « PROTEOR spécialiste du handicap et de l'orthopédie. » <http://www.proteor.fr/> (consulté le juill. 25, 2020).
- [20] « PROTHÈSE - Membre inférieur », *Chabloz orthopédie*. <https://chabloz-ortho.com/fr/prothese/prothese-membre-inferieur/> (consulté le juill. 25, 2020).
- [21] « Prothèses de sport », *BMO | Prothèse / Orthèse*. <https://bmo-prothese-orthese.fr/protheses-de-sport/> (consulté le juill. 25, 2020).
- [22] « Quand les « makers » volent au secours du handicap », *Say Yess*, nov. 27, 2017. <https://www.say-yess.com/2017/16849/makers-volent-secours-handicap/> (consulté le juill. 25, 2020).
- [23] « Quelques chiffres ». <http://lesprothesesdemains.e-monsite.com/pages/quelques-chiffres/> (consulté le juill. 25, 2020).
- [24] « Soins de la peau du moignon - Sujets spéciaux », *Édition professionnelle du Manuel MSD*. <https://www.msdmanuals.com/fr/professional/sujets-sp%C3%A9ciaux/proth%C3%A8ses-des-membres/soin-de-la-peau-du-moignon> (consulté le juill. 25, 2020).
- [25] H. Hashimoto, T. Kobayashi, F. Gao, M. Kataoka, M. S. Orendurff, et K. Okuda, « The effect of transverse prosthetic alignment changes on socket reaction moments during gait in individuals with transtibial amputation », *Gait & Posture*, vol. 65, p. 8-14, sept. 2018, doi: 10.1016/j.gaitpost.2018.06.119.
- [26] L. Impressions 3D, « Une Prothèse en 3d », févr. 02, 2015. <https://www.lesimpressions3d.com/prothese-3d/> (consulté le juill. 25, 2020).
- [27] « Les types de prothèses ». <http://choisirsaprothesetibiale.e-monsite.com/pages/les-deux-types-protheses.html>
- [28] « Quels sont les matériaux utilisés pour les prothèses ? - Prothèse Articulaire en 100 questions ». https://www.rhumatismes.net/index.php?id_q=425

VII - Annexes

Annexe 1 : Les types de prothèses selon les zones d'amputation du membre inférieur

Les prothèses inférieures servent à remplacer la partie manquante du membre inférieur du patient et elles sont spécifiques au niveau de la section de la jambe. Ces zones sont représentées sur la figure a.

Une personne ayant une amputation basse peut disposer d'une prothèse de pied. Les pieds prothétiques sont conçus pour reproduire la cinématique, le mouvement et le gain d'énergie lors de la marche.

Une personne amputée au niveau du tibia peut disposer d'une prothèse tibiale qui vient se poser sur la continuité du genou. Il garde la fonctionnalité de rotation du genou lors de la marche.

La prothèse fémorale s'adapte aux patients ayant subi une section au niveau du fémur. Cette prothèse doit remplacer la rotation du genou et le travail des muscles manquants de la jambe dans le mouvement des patients.

La prothèse de désarticulation de la hanche est destinée aux hémipelvectomies ou aux amputations transfémorales et elle s'enclenche au niveau de la hanche du patient. Ces prothèses sont constituées de toutes les parties de la jambe.

Les prothèses pour agénésie sont spécifiques et elles s'adaptent à la mal formation du membre inférieur du patient.

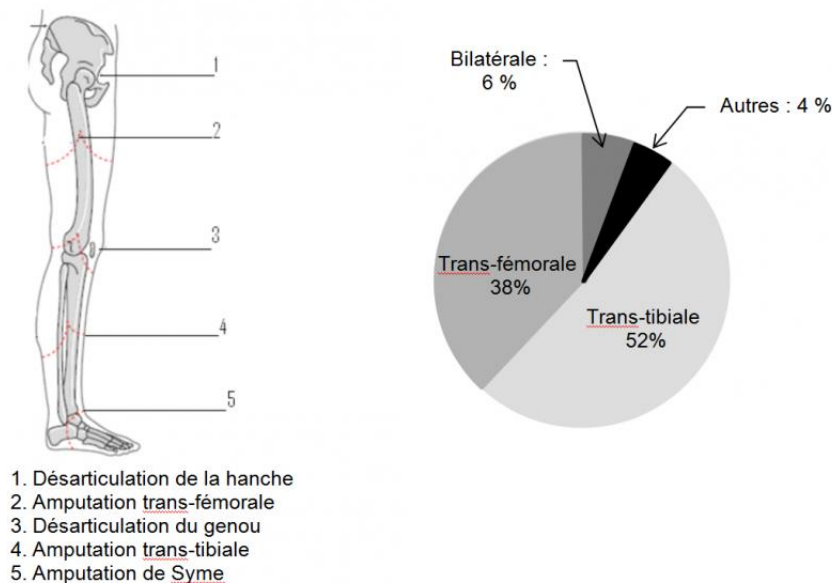
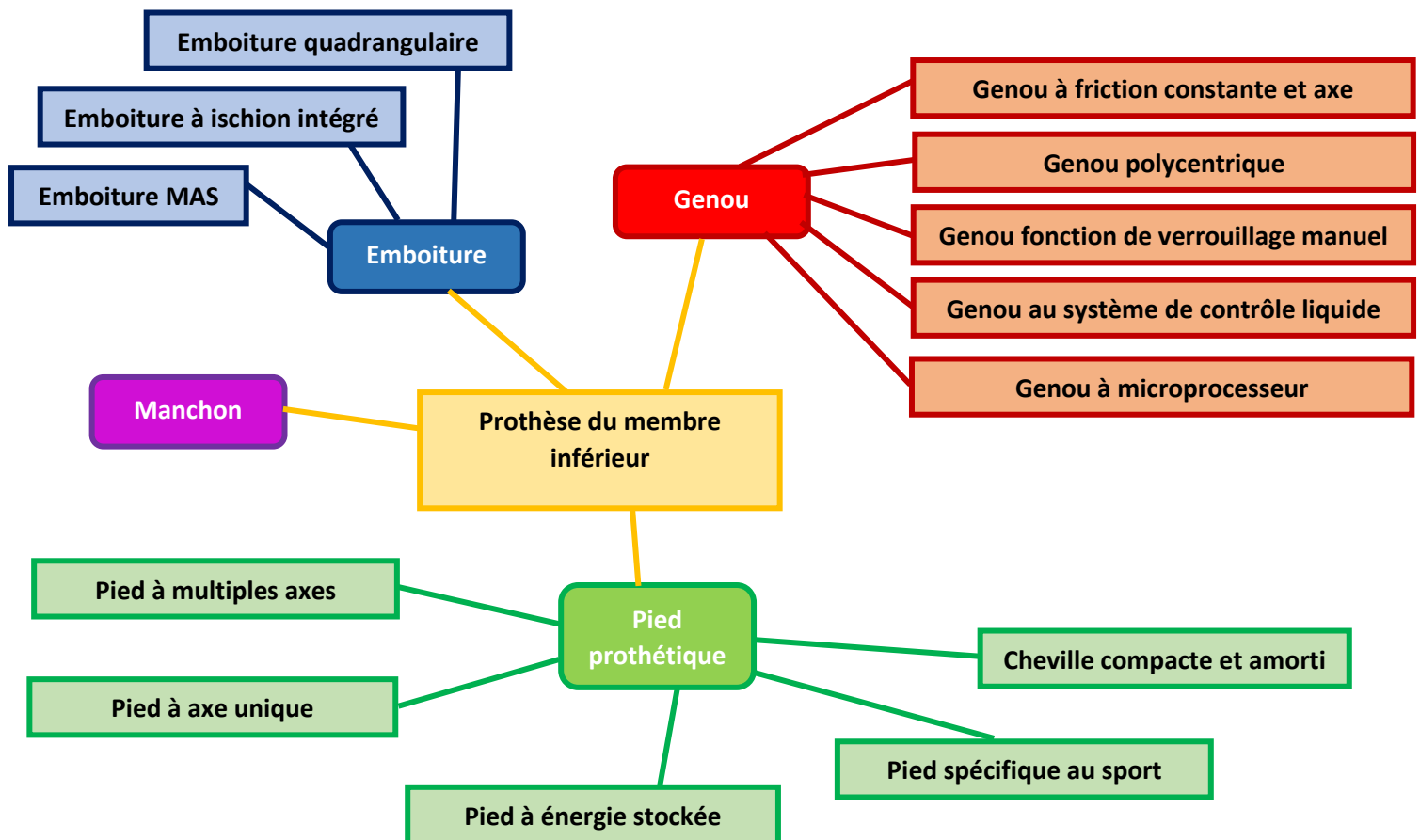


Figure a : Les zones d'amputation des membres inférieurs

D'après la figure a, les prothèses inférieures les plus présentes sont les prothèses trans-tibiale (52%) et les prothèses trans-fémorale (38%) parmi la population des amputés du membre inférieur. Les autres niveaux d'amputations restent plus rares avec le niveau bilatérales (6%) et le reste sont touchés aux autres zones (orteils, chevilles, désarticulation de genou et de hanche).

Annexe 2 : Mind Map des technologies employées dans la composition des prothèses de membres inférieures [17]



- Pied prothétique [17]

Chevilles compacte et talon amorti

Dédiée aux personnes ayant des activités limitées car cette cheville est adaptée à des pieds fixe basique. Elle apporte une stabilité au genou lorsque le talon touche le sol mais la stabilité est irrégulière lors du cycle de marche.

Pied à axe unique

Ce genre de prothèse n'est pas dédié aux personnes actives. L'articulation de la cheville donne au pied une rotation du haut vers le bas ce qui apporte une meilleure stabilité du genou dans le cas de prothèse trans-fémorale.

Pied à axes multiples (multiaxiale)

La cheville multiaxiale dispose de plusieurs articulations permettant au pied de bouger du haut vers le bas, de tourner le pied de l'intérieur vers l'extérieur et d'effectuer des rotations. Ces axes multiples permettent aux patients de pratiquer des activités car le pied s'adapte aux sols irréguliers.

Pied à énergie stocké (réponse dynamique)

Ce pied est conçu à base de carbone ce qui lui permet de stocker de l'énergie lors du cycle de marche en propulsant son utilisateur. Les patients retrouvent une démarche naturelle avec ce type de prothèse ce qui la rend apte d'utilisation pour les personnes actives.

Pied spécifique au sport

Les prothèses du pied peuvent adapter leurs géométries et leurs matériaux en fonction du sport pratiqué. (Article scientifique 2)

- Prothèse du genou [17]

Genou à friction constante et axe unique

Ce genou dispose d'une conception simple et durable et il est doté d'un seul axe avec uniquement un point d'articulation. Elle se base sur une friction constante lors du cycle de marche permettant une marche à une seule vitesse. Elle donne une stabilité au patient grâce à un bon alignement et un contrôle musculaire.

Genou polycentrique

Ce genou comprend plusieurs points d'articulations et de charnières donnant une meilleure stabilité au patient lors du cycle de marche.

Genou avec fonction de verrouillage manuel

Ce genou permet à l'utilisateur de verrouiller et de déverrouiller manuellement le genou selon les besoins. Elle donne une bonne stabilité avec son verrouillage mais elle a un mouvement limité.

Genou avec un système de contrôle liquide

Ce genou peut utiliser de l'air comprimé à base d'un système pneumatique ou bien de liquide à base d'un système hydraulique pour produire, stocker et fournir de l'énergie lors de la flexion du genou. Ces systèmes représentent des bons choix car ils permettent des marches à plusieurs vitesses et ils peuvent être adaptés à un microprocesseur.

Genou à microprocesseur

- Emboiture [17]

Emboiture quadrangulaire

La géométrie permet l'appui de l'ischion en dehors de l'emboiture.

Emboiture à ischion intégré

Utilisation d'une forme anatomique en évitant les compressions tendineuses et musculaires avec le bord interne situé au niveau de la branche ischio pubienne. Cela apporte une meilleure stabilité sans mouvement de translation possible dans le plan frontal de l'emboiture, et une meilleure mobilité du membre résiduel.

Emboiture MAS

La conception se rapproche de l'emboiture à ischion intégrée avec une géométrie qui libère les muscles fessiers provoquant une réalisation compliquée à réaliser.

Annexe 3 : Synopsis des différents assemblages et compositions de prothèses du membre inférieur [19]

Il existe un grand nombre de composants basés sur des technologies de pointes qui varient en fonction de leur capacité, de leur technicité et de leur évolution.

La figure b et la figure c représente le catalogue des composants des prothèses vendues par l'entreprise privée Proteor, une société prothésiste.

La synopsis nous permet d'avoir un visuel global sur les différentes compositions qui constituent les prothèses inférieures en fonction des besoins et des moyens du patient.

Pour la synopsis des prothèses fémorales, nous retrouvons les composants d'alignements suivis des prothèses de genoux, des liaisons tubulaires, des chevilles et des pieds prothétiques.

SYNOPSIS FEMORAL

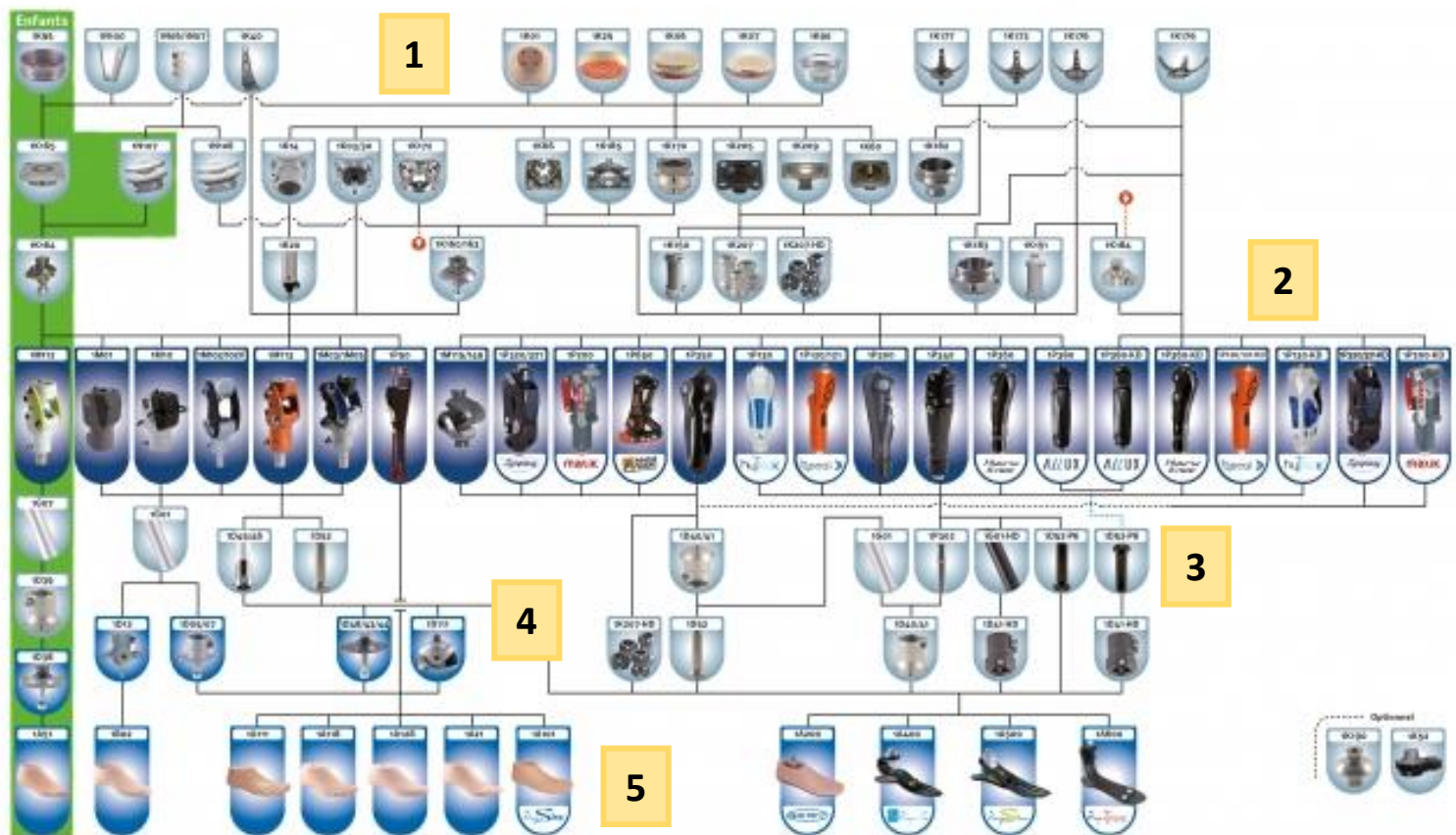


Figure b : Synopsis des composants des prothèses fémorales

Légende :

- 1 – Connecteurs et systèmes d'alignement
- 2 – Genoux prothétique
- 3 – Liaison tubulaire
- 4 – Chevilles
- 5 – Pieds prothétiques

Pour la synopsis des prothèses tibiales, nous retrouvons les composants d'alignements suivis des liaisons tubulaires, des chevilles et des pieds prothétiques.

SYNOPSIS TIBIAL

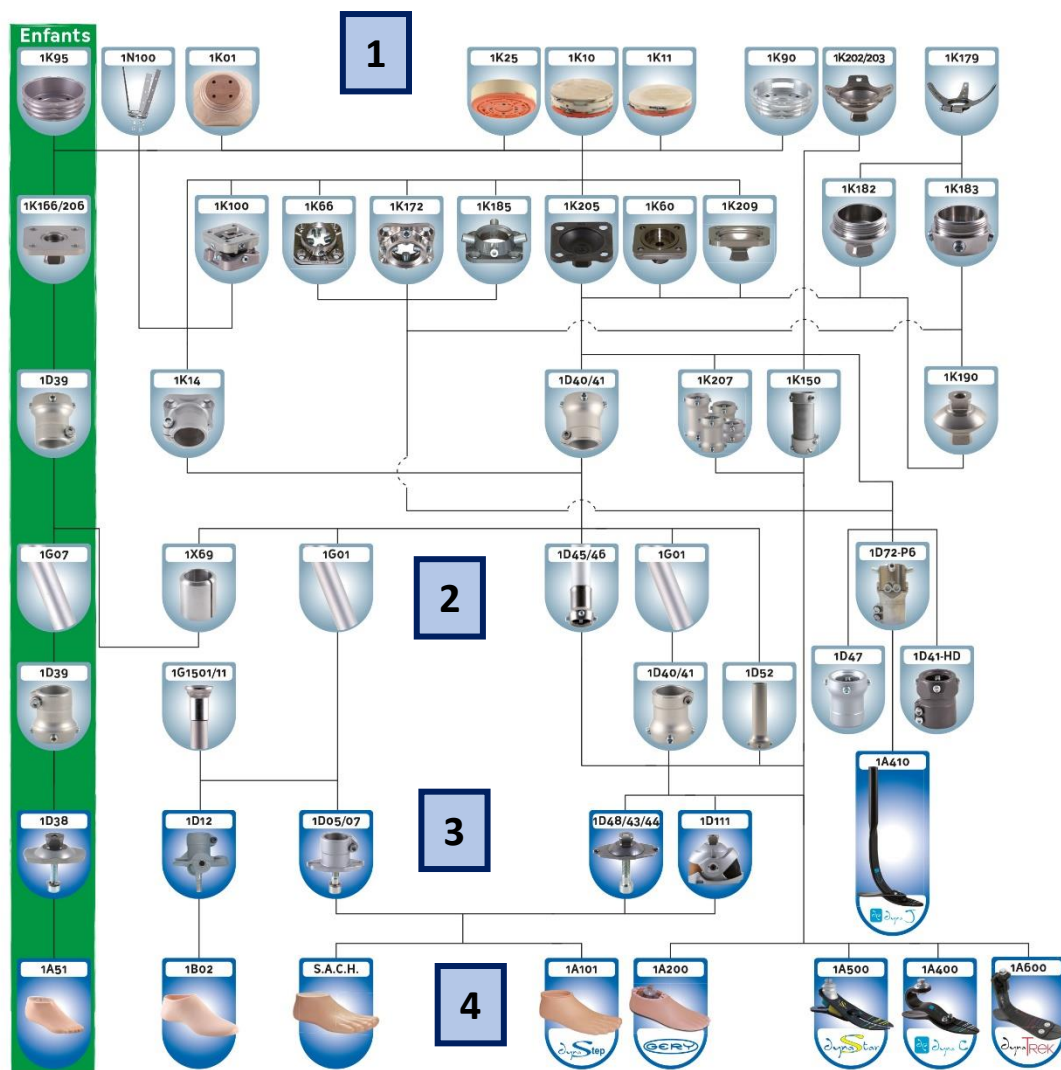


Figure c : Synopsis des composants des prothèses tibiales

Légende :

- 1 – Connecteurs et systèmes d'alignement
- 2 – Liaisons tubulaires
- 3 – Chevilles
- 4 – Pieds prothétiques



Annexe 4 : Les causes des amputations

L'association nationale ADEPA nous informe que les origines principales d'amputation sont répertoriées en trois catégories avec des causes traumatiques, pathologiques et congénitales.

En France, les amputations pathologiques touchent énormément les personnes âgées : « 80% des étiologies des amputations sont dues à des causes pathologiques dont 65% touchent les personnes de plus de 65 ans » [15]

Les amputations traumatiques représentent 20% et elles sont dues à des accidents sur la voie publique ou des accidents domestiques... Il existe d'autres causes d'amputation liées aux agénésies, aux blessures de guerre qui reste relativement rares.

Annexe 5 : Les prix des prothèses en fonction des composants

Le tableau résume les prix possibles d'une prothèse classique en fonction des composants qui la constituent [16].

Tableau des prix normalisés des PMI :

Types de composants de la prothèse	Prix
Pied prothétique P72-75	En général à 200€ Pied à restitution d'énergie les prix vont de 650€ à 2700€ selon le besoin de restitution de l'énergie
Pièce de hanche (P43)	Sur un intervalle de 1100€ à 1300€
Prothèse au niveau de cuisse avec moignon moyen ou long (P43-48)	En général de 1400€ à 1500€ selon la présence d'articulation au genou
Prothèse avec emboiture à suspension, genou et pied articulé (P43-48)	En général de 1500€ à 1700€ selon la matière de l'emboiture
Prothèse avec emboitures à suspension et verrou (ou non) au genou (P44-45)	En général de 1700€ à 2250€ selon les matériaux
Prothèse avec emboitures à suspension et verrou (ou non) au genou, pied articulé (P47-48)	En général de 2000€ à 2250€ selon les matériaux
Prothèse genou monoaxial avec régulation pneumatique et microprocesseur (P66-67)	En général de 4000€ à 4400€ selon la constitution de la prothèse
Prothèse genou monoaxial avec sécurité hydraulique, commande hydraulique commandé par un microprocesseur (P68)	En général de 14000€ à 17000€, cela dépend des sources

En plus du coût de la prothèse, les patients doivent rajouter d'autres coûts pour des dispositifs annexes. Les achats de ces dispositifs sont fréquents car nous avons vu que le moignon peut évoluer au cours du temps. Il faut donc adapter et changer des dispositifs en fonction de l'évolution corporelle du patient.

Manchons	Prix allant de 100€ à 1100€ selon la matière du manchon (mousse, caoutchouc, silicone)
Les emboitures et les gaines	Prix de 500€ et de 200€
La valve d'aspiration de l'interface	Prix de 200€

