

Résumé de la thèse

L'amputation de membre inférieur a un impact définitif sur les capacités locomotrices d'une personne, réduisant considérablement son autonomie dans la vie courante. En France, les cas d'amputation majeure sont estimés en 2012 entre 90 000 et 100 000 avec une incidence de 8300 nouveaux cas par an (entre 2010 et 2012). Dans 99% des cas, les amputations majeures concernent des amputations transfémorales, transtibiales ou des désarticulations de genou¹. Les étiologies d'amputation sont les amputations vasculaires, traumatiques, congénitales ou d'origine tumorale. Le vieillissement de la population et les problèmes de santé liés à l'obésité, au diabète et aux maladies vasculaires pourrait contribuer, dans les années à venir, à augmenter la prévalence d'amputation d'étiologie vasculaire.

L'autonomie est un vecteur d'insertion sociale important pour les personnes amputées de membre inférieur. Bien que la locomotion à plat soit aujourd'hui accessible à la plupart des personnes amputées de membre inférieur, leur autonomie reste limitée par des situations plus contraignantes rencontrées dans l'environnement quotidien (dévers, pentes, escaliers). Pour accroître l'autonomie des patients, des progrès doivent être faits au niveau de l'appareillage et de la rééducation. Pour cela une bonne connaissance des mécanismes mis en jeu lors de la locomotion des situations contraignantes est nécessaire. Ainsi, la problématique de la thèse était la compréhension de la locomotion des sujets amputés de membre inférieur en situations contraignantes par l'analyse quantifiée de la marche.

Les travaux de thèse ont été menés dans le cadre d'un projet de trois ans financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), intitulé « Appareillage des personnes amputées de membre inférieur dans les situations contraignantes de la vie courante », en partenariat avec deux centres d'appareillage et de recherche clinique, l'INI-CERAH (Centre d'Études et de Recherche pour l'Appareillage des Handicapés) et l'IRR (Institut Régional de Médecine Physique et de Réadaptation), et un industriel, l'entreprise Proteor fabricant de composants prothétiques. Le projet de thèse a donc bénéficié d'un environnement pluridisciplinaire avec, dans l'analyse des résultats de biomécanique, une étroite collaboration avec des cliniciens et ingénieurs experts du domaine.

Pour répondre à la problématique, le premier objectif de la thèse était de mettre en place un protocole permettant d'analyser la marche dans des situations contraignantes de la vie courante, différentes de la marche à plat. En réponse à cet objectif, ces travaux de thèse ont apporté plusieurs contributions d'un point de vue méthodologique. Tout d'abord, le protocole mis en place permet l'analyse cinématique et dynamique du corps entier dans cinq situations de la vie courante : le plat, le dévers (10%), la pente faiblement inclinée (5%), la pente fortement inclinée (12%) et les escaliers. La reproduction des situations en laboratoire d'analyse du mouvement a été réalisée de façon à obtenir les actions mécaniques au sol lors de la locomotion, et à faire déambuler les sujets dans toutes les situations pendant une même séance de mesure en un temps raisonnable.

De plus, à partir du protocole, deux méthodes originales ont été proposées pour l'analyse biomécanique de la locomotion :

¹ Source : mai 2013 de l'Agence Technique de l'Information sur l'Hospitalisation

- **La première méthode consiste à créer des plateformes de force virtuelles à la surface des dispositifs de marche permettant de représenter les actions mécaniques d'interaction entre le pied et le sol dans les différentes situations.** La création de plateformes de force virtuelles permet aux cliniciens et ingénieurs de visualiser directement le passage de la ligne de charge par rapport aux articulations des membres inférieurs lors de la locomotion en situations contraignantes.
- **La seconde méthode consiste à identifier des paramètres biomécaniques caractéristiques de la locomotion dans une situation et à calculer les variations de ces paramètres biomécaniques entre le plat et cette situation pour comprendre les adaptations des sujets à la situation.** L'étude des adaptations des patients par rapport à la locomotion à plat présente deux intérêts notables. Tout d'abord, l'analyse de la locomotion des sujets amputés de membre inférieur nécessite d'étudier une population hétérogène. L'appareillage, la rééducation, l'état fonctionnel, musculaire et clinique sont autant de facteurs qui modifient la locomotion des patients. L'étude des adaptations des patients par rapport à la locomotion à plat permet de tenir compte de la locomotion propre de chaque patient à plat, même dans une analyse globale menée sur une population moyenne de sujets. De plus, le calcul des variations de paramètres biomécaniques entre les situations permet de limiter la répercussion des incertitudes liées au protocole et au système de mesure. Cette méthode autorise l'interprétation de faibles variations pour caractériser les adaptations, comme c'est le cas notamment dans le plan frontal.

Le deuxième objectif de la thèse était de mettre en place une base de données pour analyser la locomotion des sujets amputés de membre inférieur dans les situations contraignantes. **Une base de données unique, au vu de la littérature, et d'envergure, tant du point de vue du nombre de paramètres que du nombre de patients, a été créée.** Elle regroupe les paramètres de la marche dans cinq situations de marche de 22 sujets amputés transtibiaux (26-71 ans), de 21 sujets amputés transfémoraux (23-75 ans) et de 30 sujets contrôles (19-74 ans) ayant suivi le même protocole.

La base de données a été utilisée d'abord pour rechercher des paramètres biomécaniques caractéristiques des adaptations de la locomotion des sujets contrôles. Ensuite, par comparaison des patients amputés aux corridors des sujets contrôles, elle a été utilisée pour identifier les fonctions à restaurer chez le sujet amputé. Deux références ont d'abord été définies à partir de la base de données : la locomotion à plat des sujets contrôles et amputés, et la locomotion en situations contraignantes des sujets contrôles. Lors de la mise en place de ces références, des travaux ont été menés pour compléter l'existant. **De nouvelles connaissances ont été apportées sur le comportement du système ostéo-articulaire et des composants prothétiques dans le plan frontal pendant la locomotion à plat. Une analyse des adaptations de la locomotion des sujets asymptomatiques en dévers par rapport au plat a permis d'établir une référence pouvant être utilisée pour comparer à une population de sujets amputés .**

Le troisième objectif de la thèse, et objectif principal, était d'analyser la locomotion des sujets amputés de membre inférieur en situations contraignantes, afin d'identifier des paramètres biomécaniques caractéristiques de leurs adaptations. Dans cette optique, **une contribution significative est apportée**

en termes de connaissances sur les adaptations de la locomotion en dévers et en pente chez les patients amputés de membre inférieur.

Il a de plus été mis en évidence que **l'analyse de la locomotion des sujets amputés pouvait être appréhendée par différentes approches**. Une approche globale permet d'identifier les fonctions locomotrices caractéristiques des adaptations d'un groupe de patients à une situation, en tenant compte de la locomotion propre à chaque patient du groupe à plat. **L'adaptation de la locomotion au dévers des sujets amputés de membre inférieur n'ayant jamais été étudiée dans la littérature, elle a été analysée pour les patients amputés transtibiaux et les patients amputés transfémoraux**. Les adaptations des sujets entre le plat et les situations contraignantes peuvent cependant être différentes entre les sujets. Une approche individuelle d'analyse permet d'identifier des paramètres biomécaniques caractérisant les adaptations de chaque patient en situations contraignantes. **Il a notamment été montré l'influence des capacités musculaires et fonctionnelles des sujets amputés transtibiaux sur leurs adaptations à la pente**. De même, les stratégies de marche telles que le vaulting chez les patients amputés transfémoraux sont utilisées différemment entre les patients. L'utilisation des approches individuelle et globale ont permis de montrer par une **quantification biomécanique que la quantité de vaulting évolue avec la difficulté de la situation**.

Ces travaux de thèse ont ainsi permis d'identifier les fonctions caractéristiques de la locomotion en pentes et en dévers. Les composants prothétiques sont conçus dans le but de restaurer le comportement des articulations physiologiques pendant la locomotion. La connaissance des fonctions motrices en situations contraignantes est donc essentielle pour développer des solutions technologiques de suppléance adaptées. De même, l'identification des fonctions ostéo-articulaires participe à intégrer l'analyse du mouvement comme outil fondamental d'amélioration des protocoles de rééducation. En particulier, en proposant des outils de quantification, ces travaux contribuent à évaluer les stratégies de compensations lors de la locomotion des patients amputés.

Les données recueillies au cours de la thèse ont permis de compléter la connaissance de la locomotion dans les situations contraignantes de la vie courante. Cette connaissance a notamment été exploitée dans le cadre du projet ANR par un transfert technologique industriel et clinique. Ainsi, l'entreprise Proteor a pu proposer un nouveau concept de genou prothétique pour personnes amputées fémorales déployé dans un prototype. L'équipe clinique de l'Institut de Réadaptation de Nancy a également bénéficié des résultats de la thèse pour ajuster leurs protocoles de rééducation en fonction des caractéristiques propres de chaque patient. Ces résultats mettent en évidence la réelle pluridisciplinarité qui a animé ce travail. La validation de la pertinence clinique de ces innovations nécessite des recherches supplémentaires et constitue la première perspective de ce travail. Outre ces perspectives immédiates, ce travail pourra aussi se prolonger grâce à des développements sur des aspects complémentaires tels que la mesure et modélisation des interactions moignon/prothèse dans l'emboîture ou encore la mise en place de mesures embarquées en environnement quotidien.