

LBM UMR_T9406 – Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs

Rapport sur le mémoire de thèse présenté par :

Coralie VILLA

Intitulé :

**« Analyse de la marche des personnes amputées de membre inférieur
en situations contraignantes de la vie courante »**

en vue d'obtenir le grade de :

**Docteur de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers,
spécialité Biomécanique**

Le travail de thèse présenté par Coralie VILLA s'inscrit au sein d'un projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche, mené en partenariat entre le LBM (Laboratoire de Biomécanique), le CERAH (Centre d'Etudes et de Recherche pour l'Appareillage des Handicapés), l'IRR (Institut Régional de Médecine Physique et de Rééducation) de Nancy et la société PROTEOR. Cette thèse, réalisée sous la direction de François LAVASTE et Hélène PILLET, vise à mieux comprendre la locomotion du sujet amputé (transfémoral et transtibial) dans les situations contraignantes (montée-descente d'une pente, marche en dévers), la marche à plat et la montée-descente d'escaliers ayant déjà été analysées lors de deux précédentes thèses au sein du laboratoire.

Le mémoire est rédigé de manière très claire et bien structurée. De nombreux schémas et tableaux de synthèse facilitent sa lecture et me semblent rendre le document accessible aux personnes étant amenées à prendre en charge les patients concernés par ce travail et faciliter l'interprétation clinique des résultats, et donner au mémoire un caractère pédagogique sans diminuer ses qualités de rigueur scientifique. Outre l'introduction et la conclusion générales, le mémoire est composé de trois parties exposant successivement la mise en place du protocole expérimental et les méthodes de calcul, les résultats concernant la base de données de référence (sujets asymptomatiques et marche à plat des sujets amputés), et enfin l'analyse des adaptations de la locomotion des sujets amputés confrontés à des situations contraignantes. Le mémoire est complété par 7 annexes, fournissant notamment le détail de certaines méthodes de calcul, l'intégralité des résultats (corridors d'évolution des paramètres cinématiques et dynamiques, tableaux de paramètres) obtenus pour la base de données des sujets asymptomatiques et la base de données des sujets amputés ainsi que les versions anglaises de deux articles : l'un soumis à la revue *Clinical Biomechanics* et l'autre accepté dans la revue *Journal of Rehabilitation Research and Development*.

L'introduction générale situe le contexte des travaux, les différents partenaires du projet et présente le plan du mémoire, en explicitant l'articulation entre les différentes parties.

La première partie expose le protocole expérimental spécifique mis en place pour analyser la marche en pente (5 et 12%) et en dévers (10%).

Le premier chapitre consiste en un état de l'art sur la locomotion des sujets asymptomatiques et amputés de membre inférieur dans les situations contraignantes, qui met en évidence l'absence de données concernant la marche en dévers des patients amputés. Cette revue bibliographique marque aussi l'importance de constituer des bases de données de référence, à la fois concernant la marche à plat (sur sol horizontal) des sujets amputés mais également la marche dans les situations contraignantes de sujets asymptomatiques afin de réaliser une étude précise des adaptations de la locomotion face à ces situations.

Le second chapitre présente le protocole expérimental mis en place et les méthodes de calcul. Des dispositifs expérimentaux similaires ont été conçus et installés sur les deux sites de collecte des données (CERAH et IRR). Ils permettent la reconstruction tridimensionnelle des trajectoires de marqueurs fixés sur les segments corporels (à l'aide d'un système d'analyse du mouvement) et, de manière synchronisée, la mesure des forces de réaction sur une piste de marche modulaire pouvant représenter un sol horizontal, en pente ou en dévers ainsi que sur quatre marches d'un escalier (par le biais de 4 plateformes de forces). Le protocole, approuvé par le Comité de Protection des Personnes, prévoit pour les sujets amputés une vérification de l'appareillage, un bilan articulaire et musculaire, un « test de marche des 6 minutes » et deux questionnaires fonctionnels. Puis, pour tous les sujets, sont réalisés : un enregistrement statique de la posture debout, suivi de 4 à 15 enregistrements (de manière à obtenir un minimum de 4 enregistrements exploitables) à vitesse de confort de marche sur sol plat horizontal, puis en dévers dans le sens aller et retour, puis en montée et descente de plans inclinés et enfin sur escalier.

En ce qui concerne les méthodes de calcul, certains choix ne me semblent pas suffisamment justifiés : le centre de la hanche est estimé à partir des équations de régression de Bell et al. (1990) établies à partir d'un échantillon relativement faible de sujets alors que Leardini et al. (1999) montrent qu'une évaluation de ce point par méthode fonctionnelle est plus précise, et donc à privilégier et enfin que Sangeux et al. (2011), publication citée dans le chapitre suivant, montrent que d'autres régressions sont a priori meilleures ... D'autre part, la séquence de rotation définie pour le calcul des angles articulaires (p. 32) : « séquence d'axes mobiles Y,X,Z ... L'angle dans le plan sagittal obtenu par la rotation autour de l'axe Y du repère anatomique du segment sous-jacent ... » ne correspond pas à celle préconisée par la Société Internationale de Biomécanique (Wu et al., 2005) alors même que Coralie VILLA y fait référence ... En effet, d'après les détails fournis en annexe C, les repères segmentaires respectent cette convention, avec l'axe Y coïncidant avec l'axe longitudinal des segments corporels, donc support de la rotation axiale plutôt que de la flexion/extension ! Pour l'équilibre dynamique du segment « pied » (équation 2, p. 36), le point O n'est pas défini ... Classiquement, il s'agit du centre géométrique de la plateforme de forces, alors que d'après l'équation, il ne peut s'agir que du centre de pression (désigné par COP dans le document) ... Enfin, le choix de décomposer la puissance articulaire selon les trois axes du repère segmentaire sous-jacent, bien que proposé par d'autres auteurs, reste une notion difficile à admettre d'un point de vue mécanique.

Le troisième chapitre s'attache à quantifier les incertitudes de mesure, à partir d'une bonne analyse de la littérature, qui conduit notamment à privilégier les analyses comparatives entre différentes situations sans démontage des marqueurs.

Une estimation de l'erreur liée au protocole spécifique sur les paramètres cinématiques est réalisée, mais néglige les artefacts de tissus mous, pourtant reconnus de manière consensuelle comme source principale de cette erreur ! Si une partie de l'effet de ces artefacts peut être considérée supprimée lors de la comparaison des différentes situations chez un même sujet, il reste néanmoins la part de variabilité de ces artefacts en fonction justement de la tâche analysée... Une estimation de l'erreur sur la position du centre de pression, pertinente du fait que

dans le protocole sont utilisés des montages particuliers entre les plateformes de forces et l'appui du pied, montre que celle-ci reste acceptable dans les différentes situations, bien qu'un peu plus élevée dans le cas des escaliers où elle atteint en moyenne 6 mm.

La seconde partie expose les données de référence obtenues, concernant la locomotion à plat des sujets asymptomatiques et amputés de membre inférieur d'une part, et la locomotion en situations contraignantes des sujets asymptomatiques d'autre part.

Le chapitre quatre débute par une revue de la littérature détaillée sur les caractéristiques biomécaniques de la marche sur sol plat des sujets amputés. La base de données pour la marche à plat est constituée de 30 sujets asymptomatiques, de 22 patients amputés transtibiaux et 21 patients amputés transfémoraux. Pour les sujets amputés, des groupes ont pu être définis selon le type de pied prothétique (bien que la plupart des patients de l'étude étaient équipés de pieds de classe III à restitution d'énergie) et le type d'articulation du genou (bien que la plupart des patients de l'étude étaient équipés de genoux avec contrôle par micro-processeur des phases d'appui et oscillante). Les résultats complètent la littérature, notamment dans le plan frontal chez les amputés. Ils mettent en évidence différentes stratégies ou défauts de marche chez les patients, qui augmentent la variabilité inter-individuelle et renforcent donc l'intérêt d'analyser les adaptations aux différentes situations pour chaque groupe, voire de manière individuelle.

Le chapitre cinq, après une analyse bibliographique portant sur la locomotion des sujets asymptomatiques, d'une part lors de la marche en pente et d'autre part lors de la marche en dévers, présente les résultats obtenus. Pour la marche en pente (29 sujets pour la pente à 5%, 23 sujets pour la pente à 12%), les adaptations déjà décrites dans la littérature sont confirmées : augmentation de la puissance générée à la hanche et rôle de la cheville en montée, et augmentation du moment d'extension au genou en descente. Pour la marche en dévers (17 sujets pour un dévers de 10%), cette thèse apporte des données nouvelles concernant les adaptations chez des sujets asymptomatiques : la cinématique de la cheville et de la hanche sont modifiées pour s'adapter à l'inclinaison de la surface d'appui et conserver le déplacement du bassin et du tronc d'une marche sur sol horizontal, alors que des modifications cinématiques des trois articulations compensent, dans le plan sagittal, la différence de hauteur entre les deux membres inférieurs.

La troisième partie concerne l'objectif principal de la thèse, à savoir l'analyse de la locomotion des sujets amputés de membre inférieur en situations contraignantes.

Le chapitre six expose une analyse des adaptations globales à la marche en dévers d'un groupe de sujets amputés en fonction de leur niveau d'amputation (13 sujets amputés transfémoraux et 15 sujets amputés transtibiaux). Les résultats de cette étude sont clairement innovants, au regard du manque de données dans la littérature sur la marche de ces patients en dévers. Ils montrent en particulier la limite des pieds prothétiques à déformation passive dans ce contexte. Toutefois, il me semble que l'effet de la vitesse de marche (qui diminue lors des situations contraignantes) aurait mérité d'être appréhendé en tant que tel, par exemple en enregistrant chez les sujets asymptomatiques des passages à vitesse plus lente.

Le chapitre sept décrit l'analyse des adaptations individuelles à une pente chez 7 sujets amputés transtibiaux, et le lien entre ces adaptations et les capacités fonctionnelles et musculaires des sujets. Ce chapitre est la traduction d'un article accepté (fourni en version anglaise en annexe) portant sur les travaux de master de K. Langlois. Les résultats mettent en évidence la nécessité de renforcer les extenseurs de hanche pour faciliter la montée d'une pente et les quadriceps,

notamment dans le cas d'un moignon court, pour aider à la descente d'une pente. Ils montrent également que la limitation de la mobilité active de cheville peut être à l'origine d'une adaptation des articulations sus-jacente, susceptible de conduire à terme à des pathologies.

Le chapitre huit combine les deux approches, globale et individuelle, pour analyser le passage du pas et en particulier l'utilisation de la stratégie de vaulting (flexion plantaire prématurée de cheville en phase d'appui unipodal du côté sain) chez 17 sujets amputés transfémoraux en pente et en dévers. L'utilisation de cette stratégie est quantifiée par le calcul de la puissance maximale de cheville lors de l'appui monopodal, une valeur seuil de 0.15 W/kg ayant été établie à partir de l'analyse de la marche à plat des amputés transfémoraux (étude qui fait l'objet d'un second article soumis, également fourni en annexe). Les résultats montrent que plus la situation est contraignante, plus le nombre de patients ayant recours à la stratégie de vaulting augmente.

La conclusion générale apporte une très bonne synthèse du travail réalisé, mais aurait peut-être mérité un meilleur développement des perspectives ouvertes, et notamment de reprendre les quelques pistes de réflexion suggérées au cours des différentes analyses permettant une meilleure adaptation des composants prothétiques aux situations contraignantes testées.

Au final, ce travail répond à un enjeu sociétal important, celui d'améliorer le niveau d'autonomie des sujets amputés de membre inférieur. Il a permis la mise en place d'une base de données conséquente et homogène des paramètres biomécaniques de la marche de patients amputés transtibiaux et transfémoraux, mais aussi de sujets contrôle, dans différentes situations contraignantes de la vie de tous les jours. Les analyses réalisées à partir de ces données ont permis de mieux comprendre les adaptations de la locomotion à ces situations contraignantes, et d'identifier les limites des composants prothétiques actuels dans ce contexte. Il est enfin à souligner que plusieurs chapitres de ce mémoire pourraient encore être valorisés sous forme d'articles dans des revues internationales.

En conséquence, je donne un avis favorable à la présentation de cette thèse devant le jury.

A Villeurbanne, le 30 décembre 2013.

Laurence Chèze
Professeur des universités.



Références :

Leardini A., Cappozzo A., Catani F., et al. "Validation of a functional method for the estimation of hip joint centre location". Journal of Biomechanics, 32 (1999) 99-103