

## Sujet de thèse 2025

### Étude couplée du travail mécanique et du coût métabolique de la marche

#### 1. Environnement

Encadrement :

- Directeur de thèse : Michel TAIX, MCF, michel.taix@laas.fr
- Codirectrice de thèse : Aurore BONNET-LEBRUN, MCF, aurore.bonnet-lebrun@laas.fr

Dates et durée de la thèse :

- Début de thèse : octobre 2025
- Durée : 36 mois

Lieu de la thèse : LAAS-CNRS (www.laas.fr, Toulouse, France)

Équipe de recherche : GEPETTO, LAAS-CNRS

GEPETTO est une équipe du LAAS-CNRS spécialisée dans l'étude des mouvements anthropomorphes. L'équipe, qui dispose d'un plateau technique complet d'analyse du mouvement situé au CREPS de Toulouse Midi-Pyrénées, s'intéresse notamment au mouvement humain et à sa simulation. Elle possède également une grande expérience sur la génération de mouvements de robots humanoïdes.

#### 2. Contexte

Le coût métabolique associé à une activité est un indicateur de l'effort demandé au sujet. Ce coût peut être amené à augmenter du fait de la tâche elle-même (ex : vitesse d'exécution, port de charge, ...), de l'environnement (ex : pente, sol meuble, ...) ou encore de l'état du sujet (ex : vieillissement, amputation, ...), tout comme il peut être diminué par un entraînement adapté [1–3]. Comprendre les mécanismes expliquant pourquoi ce coût augmente ou diminue, et donc comment on peut agir pour l'optimiser, aurait un impact sociétal fort, aussi bien dans un contexte clinique que sportif.

Pour obtenir le coût métabolique, la méthode dite *gold standard* consiste à mesurer les échanges gazeux au repos et lors d'un effort stabilisé de plus de 4 minutes [4]. L'effort long qu'implique cette mesure n'est pas toujours possible à réaliser. De plus, cette méthode ne permet pas d'obtenir un coût métabolique instantané, qui pourrait pourtant être utile pour adapter un protocole d'entraînement en direct ou contrôler des prothèses ou des exosquelettes.

Pour dépasser ces limites, de précédents travaux ont tenté d'obtenir le coût métabolique à partir du travail mécanique [5,6]. Le travail mécanique peut être mesuré sur de courtes périodes d'activité via l'analyse quantifiée du mouvement (AQM) qui combine une analyse cinématique tridimensionnelle à des mesures d'actions mécaniques. Cet examen est aujourd'hui un moyen de mesure de plus en plus routinier, que ce soit en milieu hospitalier ou en laboratoire [7]. Les études les plus simples ont utilisé le travail du centre de masse et deux efficacités fixes : l'une pour le travail négatif impliquant des phases de dissipation dite excentriques, l'autre pour le travail positif lors des phases concentriques [5] ; quand les modèles les plus complexes prennent en compte l'ensemble des muscles et un coût métabolique par muscle dépendant entre autres de son activité, de sa vitesse de contraction mais aussi du simple fait qu'il existe [1,6]. Ces derniers modèles sont particulièrement coûteux à utiliser en temps de calcul et reposent sur un nombre conséquent d'hypothèses. Peu souvent validés expérimentalement par leurs créateurs sur des conditions autres que celles qui ont servi à les définir [8,9], ces modèles sont parfois utilisés pour étudier des situations très différentes de celles sur lesquelles ils ont été développés [1,6]. Quand une comparaison à l'expérimental existe, on constate alors que ces modèles, qu'ils soient complexes ou non, peuvent s'éloigner plus [6] ou moins [1] fortement des résultats expérimentaux.

#### 3. Objectifs

La principale hypothèse de ce travail est qu'il existe une relation générale entre les variables mécaniques et le coût métabolique de la marche. Cette étude visera donc dans un premier temps à identifier cette relation générale en étudiant simultanément les variables mécaniques et le coût métabolique dans des situations de marche variée. Dans un second temps l'étude cherchera à valider cette relation par la comparaison à des données expérimentales.

Pour atteindre son objectif, ce travail impliquera à la fois une collecte de données expérimentales et le développement de modèles. En s'appuyant sur des données expérimentales portant sur des conditions de marche variées, cette étude tentera de passer outre la sur-spécialisation des modèles pour un type de modifications – généralement des variations de pentes – identifiée dans la littérature.

#### 4. Travaux de thèse envisagés

Cette thèse se composera de trois volets principaux :

- Un premier volet expérimental qui portera sur le développement et l'application de protocoles d'analyse de la marche et des échanges gazeux dans de multiples situations de marche (Figure 1). Chaque protocole concernera une dizaine de sujets, comme cela se fait usuellement en biomécanique, afin d'atteindre un seuil de significativité statistique pour chaque paramètre étudié, tout en tenant compte des variations inter-individuelles. A minima trois types de variations des situations de marche seront étudiées afin d'avoir un aperçu plus général des relations entre les paramètres mécaniques et métaboliques au cours de la marche. Cela permettra également de tester les propositions de relation entre ces paramètres sur une situation n'ayant pas servi à la développer. Ce premier volet impliquera de prendre en main un certain nombre d'outils expérimentaux tels que le dispositif de mesure des échanges gazeux et le système d'analyse du mouvement.
- Un deuxième volet modélisation qui, en se nourrissant des données expérimentales, permettra de proposer une relation générale entre les paramètres mécaniques et métaboliques au cours de la marche. Plusieurs pistes pourront être envisagées : développement à partir de modèles préexistants, développement d'un modèle en propre ou utilisation du *Machine Learning*.
- Un dernier volet portant sur la validation dans de nouvelles situations des relations obtenues.

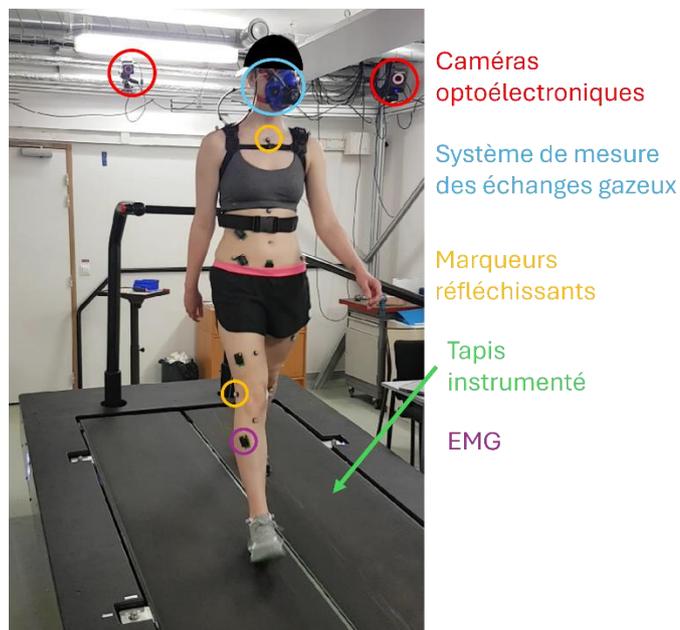


Figure 1 : Exemple de conditions d'acquisition

Dans ce protocole, des mesures d'échange gazeux ont été couplées à une analyse tridimensionnelle de la marche et à l'acquisition de signaux d'activité musculaire. Les données ont été acquises en utilisant un tapis instrumenté permettant de récupérer les efforts au sol et de réaliser des conditions de pente (ici une légère descente).

## 5. Mots Clefs

Biomécanique, Acquisitions expérimentales, Coût métabolique, Travail mécanique, Modélisation

## 6. Profil et candidature

Le(a) candidat(e) pour la thèse doit posséder un diplôme de master 2 ou être en fin d'études d'ingénieur avec une expérience de recherche en (bio)mécanique. Il(elle) doit avoir des compétences en programmation python et/ou Matlab. Un goût pour l'expérimentation serait un plus. La maîtrise de l'anglais est indispensable.

Pour candidater à cette thèse, merci d'envoyer votre CV, lettre de motivation et lettre de recommandation à michel.taix@laas.fr et aurore.bonnet-lebrun@laas.fr.

## 7. Bibliographie

- [1] T.W. Dorn, J.M. Wang, J.L. Hicks, S.L. Delp, Predictive simulation generates human adaptations during loaded and inclined walking, *PLoS One*. 10 (2015) 1–16.
- [2] S. Ettema, E. Kal, H. Houdijk, General estimates of the energy cost of walking in people with different levels and causes of lower-limb amputation: a systematic review and meta-analysis, *Prosthet. Orthot. Int.* 45 (2021) 417–427.
- [3] P.E. Martin, D.E. Rothstein, D.D. Larish, Effects of age and physical activity status on the speed-aerobic demand relationship of walking, *J. Appl. Physiol.* 73 (1992) 200–206.
- [4] B. Adeyeri, S.A. Thomas, C.J. Arellano, A simple method reveals minimum time required to quantify steady-rate metabolism and net cost of transport for human walking, *J. Exp. Biol.* 225 (2022) 1–11.
- [5] P.G. Adamczyk, A.D. Kuo, Mechanisms of gait asymmetry due to push-off deficiency in unilateral amputees, *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 23 (2015) 776–785.
- [6] A.D. Koelewijn, A.J. Van Den Bogert, Joint contact forces can be reduced by improving joint moment symmetry in below-knee amputee gait simulations, *Gait Posture*. 49 (2016) 219–225.
- [7] M.H. Schwartz, A. Rozumalski, J.P. Trost, The effect of walking speed on the gait of typically developing children, *J. Biomech.* 41 (2008) 1639–1650.
- [8] L.J. Bhargava, M.G. Pandy, F.C. Anderson, A phenomenological model for estimating metabolic energy consumption in muscle contraction, *J. Biomech.* 37 (2004) 81–88.
- [9] R. Margaria, Positive and Negative Work Performances and Their Efficiencies in Human Locomotion, *Int. Zeitschrift Für Angew. Physiol.* 25 (1968) 339–351.