



SUJET DE THESE 2023 - 2026

---

**Laboratoires de Recherche : IBHGC (Paris) & LAAS-CNRS (Toulouse)**

**Mot(s)-clé(s) : Biomécanique, locomotion, instabilité, risque de chute, prévention, expérimentations**

**Responsables du sujet :** Bruno Watier & Hélène Pillet

**E-mail:** [bruno.watier@laas.fr](mailto:bruno.watier@laas.fr) et [helene.pillet@ensam.eu](mailto:helene.pillet@ensam.eu)

**Durée de la Thèse :** 36 mois

**Titre de la thèse :** *BAC2WALK : Etude expérimentale de l'instabilité de la locomotion bipède*

### **Contexte scientifique**

La capacité à maintenir en toutes circonstances la locomotion est un élément clé pour maintenir l'autonomie des personnes dont l'appareil locomoteur est altéré en raison du vieillissement, d'un handicap ou d'une pathologie. L'évitement de la chute est au cœur de la rééducation de la marche. Cependant, à ce jour, il n'existe pas d'indicateur fiable accessible dans le domaine clinique qui pourrait être utilisé pour suivre la progression individuelle et donner un feedback aux patients et au personnel clinique quant au rétablissement de la marche saine. Deux obstacles expliquent ce manque d'outils quantitatifs : l'absence d'un critère pertinent facilement interprétable et la difficulté d'obtenir des données biomécaniques fiables sur le terrain.

En raison de la nature mécanique intrinsèque du phénomène, les spécialistes de neurosciences, de contrôle moteur, de biomécanique ou encore de robotique ont proposé des approches expérimentales et numériques pour comprendre la manière dont l'équilibre de la locomotion pourrait être contrôlé. En particulier, les variations du moment angulaire ont été étudiées pendant la marche et se sont révélées être un bon descripteur de l'instabilité en comparant la population valide et les personnes âgées ou amputées par exemple [1]. Le contrôle de la dynamique, pour générer des trajectoires pertinentes pour un robot bipède, repose sur la même modélisation dynamique fondamentale. Aussi, des mesures expérimentales qui pourraient être utilisées pour quantifier l'instabilité pendant la locomotion chez l'homme ou le robot par la capture en temps réel de signaux mécaniques n'ont pas encore été proposées. De telles mesures sont la condition préalable à une mise en œuvre efficace de critères en milieu clinique afin de personnaliser l'entraînement et accélérer la rééducation.

Pour surmonter les limitations actuelles dans l'identification d'un marqueur mécanique pertinent de l'instabilité de la marche, l'ambition de ce projet est de combiner les approches complémentaires développées en biomécanique et en robotique : 1/ trouver et évaluer des biomarqueurs mécaniques de l'instabilité de la marche 2/ étudier la faisabilité de leur suivi en temps réel pendant la marche grâce à des prototypes portables.

### **Méthodologie**

Ce projet de thèse comportera 5 axes de recherche complémentaires et décrits ci-dessous (voir aussi Fig. 1).

1 : *Etude théorique de l'instabilité de la marche et test sur des données de capture de mouvement.* Cette première tâche consiste en une analyse dynamique complète de la locomotion bipède à partir d'une modélisation multicorps. Différentes approches seront testées pour décrire l'instabilité. Cette tâche pourrait conduire à la modification de l'indice initial proposé par les équipes de recherche impliquées [2][3] en intégrant d'autres approches. La détermination d'un critère d'instabilité permettant de prédire un risque de chute reste encore un problème ouvert.

2 : *Conception d'algorithmes.* La conception d'algorithmes pour le traitement des données portables nécessaires au calcul de l'indice sera réalisée à partir de l'expertise existante des équipes et des données acquises dans le présent projet pendant une première phase d'expérimentation sur tapis roulant. Cet algorithme devra être adapté à la configuration finale du système embarqué choisi. Les algorithmes seront ensuite affinés en utilisant les données de la deuxième phase expérimentale sur tapis roulant incluant un ensemble minimal de capteurs embarqués dans un processus itératif.

3 : *Collecte et traitement des données sur un tapis roulant.* Sur la base de la littérature existante, un protocole spécifique sera conçu en utilisant un tapis roulant à double bande récemment acquis à l'IBHGC. Ce tapis roulant permet de faire varier la vitesse de chaque pied indépendamment afin de simuler un scénario d'instabilité inattendu. Dans la première phase de cette tâche et après approbation du comité d'éthique, des sujets seront recrutés pour les

analyses expérimentales. Le tapis de course est équipé de plateformes de force capables de mesurer les actions mécaniques au niveau du contact entre le pied et le sol. Combiné à un système de capture optique du mouvement, il sera utilisé pour calculer l'indice d'instabilité comme dans [2]. Dans une deuxième phase, l'expérience sera dupliquée avec un ensemble réduit de capteurs embarqués (IMUs) et de semelles développées par ailleurs dans le projet. A partir de ces données, les algorithmes seront affinés et la combinaison des IMUs et des semelles instrumentées sera validée.

4 : *Collecte et traitement de données de robots bipèdes* : La reproduction expérimentale de chutes chez l'homme est très difficile et soulève des problèmes éthiques qui entravent l'analyse du critère pendant la chute. Pour remédier à ce problème, nous proposons d'utiliser des robots humanoïdes comme modèles réalistes pour étudier l'évolution du critère pendant la chute, en s'appuyant sur l'expertise de l'équipe Gepetto du LAAS-CNRS et des critères optimaux sous contraintes. Les différentes plateformes utilisées (HRP2, Talos) représentent un moyen pertinent de suivre les données mécaniques lors des chutes réelles de ces robots. L'instrumentation existante des capteurs de force du robot (caméras, LIDAR, capteurs de forces 6 axes, IMUs) sera utilisée pour stocker en continu les données nécessaires (forces de contact externes et position du COM). Ces données permettront à l'équipe de calculer le critère d'instabilité pour les robots bipèdes notamment pour prévenir chute.

5 : *Identification des seuils* : A partir de l'évolution de l'indice d'instabilité en situation normale et perturbée, le critère sélectionné sera calculé en fonction de l'instrumentation et des algorithmes du dispositif développé par ailleurs dans le projet. En particulier, les variations interindividuelles seront quantifiées afin de déterminer si une personnalisation des seuils est nécessaire ou si une valeur sans dimension peut prédire l'instabilité de la locomotion pour tous.

#### Lieu de la thèse :

La thèse s'effectuera entre Paris et Toulouse au sein de l'IBHGC au sein de l'équipe Gepetto du LAAS-CNRS. Elle sera financée dans le cadre de l'ANR BAC2WALK.

L'Institut de Biomécanique Humaine Georges Charpak d'Arts et Métiers ParisTech a une expertise reconnue en modélisation personnalisée du système locomoteur. Notamment, l'Institut applique depuis plus de dix ans ces recherches dans le domaine du handicap et en particulier concernant la locomotion des sujets amputés appareillés. Ces recherches ont porté sur la définition de protocoles spécifiques adaptés à l'étude de situations particulières en laboratoire, sur la modélisation de la cinématique et de la dynamique des segments du corps sains et prothétiques au cours du mouvement et sur l'analyse fonctionnelle des données issues de collecte de données expérimentales. Pour mener ces analyses, l'Institut utilise des moyens techniques tels que des systèmes d'analyse 3D du mouvement, des centrales inertielles, des plateformes de force et possède la maîtrise de l'utilisation de ces moyens.

GEPETTO est une équipe du LAAS-CNRS spécialisée dans l'étude des mouvements anthropomorphes, et possède une grande expérience sur la génération de mouvements pour les robots humanoïdes. Basé à Toulouse, le groupe GEPETTO s'occupe des robots HRP-2 et Pyrène qui sont les robots humanoïdes parmi les plus performants. L'équipe s'intéresse également au mouvement humain et à sa simulation. Elle possède un plateau technique complet d'analyse du mouvement expérimental situé au CREPS de Toulouse Midi-Pyrénées.

#### Prérequis :

- Compétences avérées en programmation Python et/ou Matlab
- Dynamique des solides rigides
- La pratique de l'anglais niveau B2/C1 est exigée
- Des connaissances en biomécanique et/ou en robotique seront un plus

#### Envoyer CV et lettre de motivation à :

- [helene.pillet@ensam.eu](mailto:helene.pillet@ensam.eu) & [bruno.watier@laas.fr](mailto:bruno.watier@laas.fr)

#### Références :

- [1] Neptune R, Vistamehr A. Dynamic Balance during Human Movement: Measurement and Control Mechanisms. J. Biomech. Eng. 2019;141:070801.
- [2] Bailly FF, Carpentier J, Pinet B, Souères P, Watier B, Soueres P, et al. A Mechanical Descriptor of Human Locomotion and its Application to Multi-Contact Walking in Humanoids. Proc. IEEE RAS EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics.; 2018-Augus:350–6.
- [3] Al-Abiad N, Pillet H, Watier B. A mechanical descriptor of human locomotion: Experimental findings in above-knee amputees compared to controls. Gait Posture



Fig. : Etude de l'instabilité lors de la locomotion chez l'amputé et le robot bipède