

Sujet de Thèse de doctorat

simulation MUsculo-squelettique et Structure Elastique pour le Sport (MUSES)

I. Profil recherché

Nous recherchons un.e candidat.e pour préparer une thèse de doctorat dès la rentrée 2019. La candidate ou le candidat devra être titulaire d'un master 2 en biomécanique ou en mécanique et, si possible, de justifier de compétences en développement informatique et en méthodes numériques. Une expérience d'usage des outils expérimentaux (capture de mouvement, électromyographie, plateformes de force) sera un plus important. Un bon niveau en anglais international sera également nécessaire. Une curiosité scientifique et un goût pour le travail pluridisciplinaire seront également appréciés.

II. Contacts et Encadrement

Ce projet est porté dans un contexte de recherche pluridisciplinaire par :

- Georges Dumont, mécanique, ENS Rennes (Georges.Dumont@ens-rennes.fr)
- Charles Pontonnier, mécanique, ENS Rennes (Charles.Pontonnier@ens-rennes.fr)
- Nicolas Bideau, sciences du sport, Université de Rennes 2 (nicolas.bideau@univ-rennes2.fr)
- Guillaume Nicolas, sciences du sport, Université de Rennes 2 (guillaume.nicolas@univ-rennes2.fr)

Cette thèse se déroulera à l'École normale supérieure de Rennes (ENS Rennes) au sein de l'équipe projet MimeTic (<https://team.inria.fr/mimetic/>) commune à l'IRISA (UMR 6074), au centre Inria Bretagne atlantique et au M2S (EA 7470).

III. Résumé du projet

L'élasticité joue un rôle majeur dans la performance dans de nombreuses activités sportives. En particulier, les sports impliquant un contact entre le sportif et son environnement. Cette interaction sportif-matériel décrit deux systèmes, habituellement considérés de manière isolée, en une approche couplée permettant d'étudier les déformations et vibrations induites par le sportif ainsi que les réponses biomécaniques humaines à ces déformations ou vibrations. L'athlète doit donc adapter sa technique en utilisant au maximum les propriétés élastiques de son matériel. Ceci passe par une adaptation de la biomécanique de l'athlète aux caractéristiques (longueur, raideur, etc.) de son matériel. La stratégie du sportif ne consiste donc pas seulement à transformer l'énergie cinétique acquise durant le mouvement en énergie potentielle pour la structure mais également à créer judicieusement des efforts sur le matériel afin de réaliser un mouvement optimal en utilisant l'énergie de déformation.

Ce projet a pour objectif de développer un modèle d'interaction sportif matériel qui lie la biomécanique humaine et la dynamique des structures. Cette nouvelle approche consistera à appliquer des connaissances en biomécanique humaine au domaine de la dynamique des structures déformables utilisées dans certaines spécialités sportives et à identifier des

caractéristiques dynamiques de l'interaction dans un objectif de réalisation d'un mouvement optimal.

IV. Sujet de thèse

I. Positionnement

Dans le contexte de la simulation musculo-squelettique, peu de travaux se sont intéressés aux transferts énergétiques. Les travaux les plus significatifs concernent la simulation de la marche et de la course à pied (Rajagopal et al., 2016 ; Sasaki and Neptune, 2006).

Du point de vue de la dynamique des structures, la plupart des travaux portant sur l'interaction humain- matériel, se sont focalisés sur les actions humaines sur les structures au travers d'analyses statiques (e.g. debout, assis), d'évaluation du mouvement couplé suivant une approche temporelle (e.g. saut localisé et standardisé) ou encore selon une analyse du déplacement en espace et en temps (i.e. course, saut avec prise d'élan).

Ainsi, les modèles biomécaniques humains en dynamique des structures et vibrations ont été représentés au travers des approches suivantes :

- modélisation par un chargement mobile lorsque le sportif se déplace
- modélisation sous forme de système masse-ressort- amortisseur (principalement lors de mouvements localisés, e.g. 1D en déplacement vertical).

Peu de travaux modélisent le sportif en interaction sous forme de modèle biomécanique complet (musculo-squelettique), la question des niveaux de transfert d'énergie et des synchronisations temporelles optimales demeurant ouverte.

La recherche de l'amélioration des performances au travers de solutions scientifiques innovantes pour le couplage entre l'athlète et son matériel est d'actualité au regard de l'échéance des JO en France. Le caractère générique du modèle va enrichir la connaissance des entraîneurs et des athlètes et, à terme, nous pensons que les résultats obtenus permettront une meilleure connaissance et une meilleure conception des matériels techniques à destination des sportives et sportifs.

II. Hypothèses, questions posées, identification des points de blocage

À ce jour, indépendamment de l'interaction avec le matériel, la littérature biomécanique a abordé les évaluations énergétiques au cours du mouvement principalement au travers de la notion de travail mécanique. Ce travail a été quantifié en utilisant différentes méthodes permettant d'identifier les contributions en termes de travail externe, travail interne et travail articulaire. Le travail mécanique externe est le travail mécanique produit par un chargement externe -e.g. en pédalage (van Ingen Schenau et al., 1990)- et par le mouvement du centre de masse -e.g. en course à pied (Cavagna et al., 1963-). Le travail interne est habituellement défini comme étant le travail nécessaire pour déplacer les segments corporels par rapport au centre de masse. Ce dernier peut être calculé au travers des variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle au cours du mouvement (Cavagna and Kaneko, 1977; Winter, 1979). Toutefois, les travaux internes et externes présentent plusieurs limites pour la quantification des transferts énergétique au cours du mouvement humain. Ainsi, il existe une certaine ambiguïté concernant le transfert d'énergie entre segments corporels (Willems et al., 1995) et un manque d'indépendance entre les travaux internes et externes qui ne permet pas de calculer le travail mécanique comme une simple somme des deux mesures (Aleshinsky, 1986a; Kautz and Neptune, 2002). Par ailleurs, ces estimations ne fournissent qu'une vision parcellaire du travail mécanique produit par les muscles pris de manière individuelle durant

des tâches motrices (Aleshinsky, 1986b; Kautz and Neptune, 2002). Le travail articulaire, calculé comme l'intégrale temporelle des puissances nettes articulaires par une approche de dynamique inverse standard, est censé représenter le travail musculo-tendineux de manière plus précise que par le travail interne et externe. Les avantages du travail articulaire sur l'approche des travaux internes/externes a été démontré dans des études précédentes sur des tâches de pédalage, de marche et de course (Alexander1992). L'approche par l'estimation des travaux articulaires admet un certain nombre de limitations. L'une des limitations principales réside dans l'incapacité de la plupart des modèles utilisés à tenir compte des contributions individuelles des muscles au travail mécanique externe, principalement du fait de la co-contraction induisant un moment net inférieur à la somme des moments de flexion et d'extension pour les muscles individuels. De plus, l'énergie élastique stockée puis relâchée par les tendons peut induire un travail négatif qui peut être transformé en travail positif dans une autre phase du mouvement. Pour pallier ces limitations, la modélisation musculo-squelettique constitue une solution de choix pour l'estimation des contributions énergétique de chaque chef musculaire au cours du mouvement (Pouliquen2018, Muller2018, Muller2018, Muller2019). Jusqu'à présent ce type de modèle s'est focalisé sur la biomécanique du système musculo- squelettique en lien avec des efforts externes n'émanant pas de structures déformables.

III. Approches méthodologique et technique envisagées

À partir de la construction d'un modèle générique d'interaction entre un sportif et une structure déformable élastique, deux applications principales sont envisagées :

- le saut à la perche
- le plongeon.

En effet, dans chaque cas le matériel utilisé fournit un moyen efficace de convertir l'énergie cinétique du sportif en énergie potentielle, par la faculté des structures à fléchir et stocker de l'énergie élastique restituable. Ainsi un modèle de poutre semble particulièrement adapté pour représenter la réponse dynamique et énergétique du matériel sportif employé tandis qu'une approche par modélisation musculo-squelettique permettra d'évaluer les travaux et efforts musculaires associés nécessaires pour produire une performance optimale.

La réalisation de ce projet passe alors par :

- L'application des concepts biomécaniques à l'analyse du sportif en interaction avec un matériel déformable lors de la réalisation d'un mouvement :
 - Analyse de mouvement,
 - Coordination articulaire et musculaires,
 - Évaluation des efforts internes et externes.
- L'établissement d'un modèle de couplage entre un système multi- corps rigide (système humain) et une structure déformable élastique (matériel sportif), par exemple sous forme de poutre 3D à réponse non-linéaire. Une attention particulière sera portée sur la résolution du couplage pour intégrer solution du système déformable au sein du solveur d'analyse du mouvement. Dans un premier temps, une approche hybride analytique numérique sera envisagée.
- L'identification des réponses globales du système couplé :

- Évaluation des énergies impliquées et des dissipations associées ainsi que la temporalité de ces transferts énergétiques.
- Évaluations intra-systèmes et inter- systèmes.
- La définition de critères d'optimalité de l'interaction :
 - Optimisation des caractéristiques matérielles
 - Optimisation des mouvements humains (coordination motrice, transfert d'énergie entre segments corporel, etc.)
 - Optimisation et chargements (orientation et intensité des efforts) appliqués par le sportif.

V. Financement

Cette thèse est cofinancée par la région Bretagne et se déroulera dans le cadre d'un contrat l'École normale supérieure de Rennes. Il sera possible d'exercer une activité d'enseignement dans le cadre des activités complémentaires (64h par an). Le salaire est d'environ 1350€ net mensuel. Le montant des activités complémentaires est entre 250 et 300€ par mois. <http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid76053/le-financement-doctoral.html>

VI. Plateforme expérimentale

La salle immersive IMMERMOME sera la plateforme expérimentale principale utilisée dans le cadre de ce projet, a été partiellement financée dans le cadre du dernier Contrat de Plan État Région Bretagne. Elle est portée dans le cadre du projet Immerstar par l'ENS Rennes, l'Université de Rennes 2, l'Université de Rennes, l'INSA de Rennes et le centre de recherche INRIA Bretagne/Atlantique, tous également associés au laboratoire IRISA UMR 6074 dont l'équipe MimeTIC est une des équipes et également portée par le M2S (EA7470).

VII. Références

- Aleshinsky, S. Y. (1986a). An energy 'sources' and 'fractions' approach to the mechanical energy expenditure problem. II. Movement of the multi-link chain model. *J. Biomech.* 19, 295-300.
- Aleshinsky, S. Y. (1986b). An energy 'sources' and 'fractions' approach to the mechanical energy expenditure problem. IV. Criticism of the concept of 'energy transfers within and between links'. *J. Biomech.* 19, 307-309.
- Cavagna, G. A. and Kaneko, M. (1977). Mechanical work and efficiency in level walking and running. *J. Physiol.* 268, 467-481.
- Cavagna, G. A., Saibene, F. P. and Margaria, R. (1963). External work in walking. *J. Appl. Physiol.* 18, 1-9.
- Kautz, S. A. and Neptune, R. R. (2002). Biomechanical determinants of pedaling energetics: internal and external work are not independent. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 30, 159-165.
- A. Muller, C. Pontonnier, P. Puchaud and G. Dumont, (2019). CusToM: a Matlab toolbox for musculoskeletal simulation. *Journal of Open Source Software*, 4(33), 927, <https://doi.org/10.21105/joss.00927>
- A. Muller, C. Pontonnier and G. Dumont, (2018b), « MusIC method enhancement by a sensitivity study of its performance: Application to a lower limbs musculoskeletal model », *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 10 pages, 10.1080/10255842.2018.1541455.

A. Muller, C. Pontonnier, G. Dumont, (2018a) « The MuslC method: a fast and quasi-optimal solution to the muscle forces estimation problem », *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 12 pages. doi: 10.1080/10255842.2018.1429596.

Pouliquen C., Nicolas G., Bideau., Garo G., Megret A., Delamarche, P., Bideau N. (2018). Spatiotemporal analysis of 3D kinematic asymmetry in professional cycling during an incremental test to exhaustion. *J Sports Sci.* 36 (19), 2155-2163.

Rajagopal A, Dembia CL, DeMers MS, Delp DD, Hicks JL, Delp SL (2016). Full-Body Musculoskeletal Model for Muscle-Driven Simulation of Human Gait. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2016 Oct;63(10):2068-79.

Sasaki, K. and Neptune, R. R. (2006). Muscle mechanical work and elastic energy utilization during walking and running near the preferred gait transition speed. *Gait & Posture* 23, 383-390.

van Ingen Schenau, G. J., van Woensel, W. W., Boots, P. J., Snackers, R. W. and de Groot, G. (1990). Determination and interpretation of mechanical power in human movement: application to ergometer cycling. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 61, 11-19.

Willems, P. A., Cavagna, G. A. and Heglund, N. C. (1995). External, internal and total work in human locomotion. *J. Exp. Biol.* 198, 379-393.

Winter, D. A. (1979). A new definition of mechanical work done in human movement. *J. Appl. Physiol.* 46, 79-83.

PhD proposal

Musculoskeletal simulation and Elastic Structure for Sports

(MUSES)

Project summary

Elasticity plays a major role in performance in many sports activities involving contact between the athlete and his environment. This sport-material interaction describes two systems, usually considered in isolation, as a coupled approach to study the deformations and vibrations induced by the athlete as well as the human biomechanical responses to these deformations or vibrations. The athlete must adapt his technique using the maximum elastic properties of his equipment. This involves adapting the athlete's biomechanics to the characteristics (length, stiffness, etc.) of his equipment. The athlete's strategy therefore consists not only of transforming the kinetic energy acquired during the movement into potential energy for the structure, but also of judiciously creating efforts on the material to achieve optimal movement using the deformation energy.

This project aims to develop a model of physical sports interaction that links human biomechanics and dynamics of structures. This new approach will consist of applying human biomechanical knowledge to the field of dynamics of deformable structures used in certain sports specialties and identifying dynamic characteristics of the interaction to achieve optimal movement.

Thesis topic

Positioning

In the context of musculoskeletal simulation, there has been little work on energy transfers. The most significant work concerns the simulation of walking and running (Rajagopal et al., 2016, Sasaki and Neptune, 2006).

From a structural dynamics point of view, most of the work on human-material interaction has focused on human actions on structures through static (e.g. standing, seated), motion coupled according to a temporal approach (e.g. localized and standardized jump) or according to an analysis of the displacement in space and time (e.g. race, jump with momentum).

Thus, human biomechanical models in dynamics of structures and vibrations have been represented through the following approaches:

- modeling by a mobile loading when the athlete moves
- modeling in the form of a mass-spring-damper system (mainly during localized movements, e.g. 1D in vertical displacement).

Since few studies model the athlete in interaction as a complete biomechanical model (musculoskeletal), the question of energy transfer levels and optimal timing synchronizations remains open.

The search for improved performance through innovative scientific solutions to study the coupling between the athlete and his equipment is timely in view of the deadline of the Olympics in France. The generic character of the model will enrich the knowledge of coaches and athletes and, in the long term, we believe that the results obtained will allow a better knowledge and a better conception of the technical materials intended for the sports.

Assumptions and key scientific points

To date, regardless of the interaction with the material, the biomechanical literature has addressed the energy assessments during the movement mainly through the notion of mechanical work. This work was quantified using different methods to identify contributions in terms of external work, internal work and joint work. External mechanical work is the mechanical work produced by an external load -e.g. in pedaling (van Ingen Schenau et al., 1990) - and by the movement of the center of mass -e.g. in running (Cavagna et al., 1963-). Internal work is usually defined as the work required to move body segments relative to the center of mass. The latter can be calculated through variations in kinetic energy and potential energy during movement (Cavagna and Kaneko, 1977, Winter, 1979). However, internal and external work has several limitations for the quantification of energy transfers during human movement. Thus, there is some ambiguity regarding the transfer of energy between body segments (Willems et al., 1995) and a lack of independence between internal and external work that does not allow to calculate the mechanical work as a simple sum of two measures (Aleshinsky, 1986a, Kautz and Neptune, 2002). Moreover, these estimates provide only a fragmentary view of the mechanical work produced by muscles taken individually during motor tasks (Aleshinsky, 1986b, Kautz and Neptune, 2002). Joint work, calculated as the temporal integral of articular net powers by a standard inverse dynamic approach, is supposed to represent musculotendinous work more accurately than by internal and external work. The benefits of joint work on the internal / external work approach has been demonstrated in previous studies of pedaling, walking and running tasks (Alexander 1992). The approach by the estimation of the articular works admits a certain number of limitations. One of the main limitations is the inability of most of the models used to account for the individual contributions of muscles to external mechanical work, mainly because of co-contraction inducing a net moment lower than the sum of bending moments and extension for the individual muscles. In addition, the elastic energy stored and released by the tendons can induce negative work that can be transformed into positive work in another phase of the movement. To overcome these limitations, musculoskeletal modeling is an appealing solution to estimate the energy contributions of each muscle head during the movement (Pouliquen2018, Muller2018, Muller2018, Muller2019). Until now, this type of model has focused on the biomechanics of the musculoskeletal system in relation to external forces that do not emanate from deformable structures.

Methodology

Starting from the construction of a generic model of interaction between an athlete and a slender deformable structure, two main applications are envisaged:

- Pole vault
- Olympic diving

Indeed, in each case the material used provides an effective means of converting the kinetic energy of the athlete into potential energy, by the ability of structures to flex and store elastic energy that could be restituted. Thus, a beam model seems particularly suited to represent the dynamic and energetic response of the sports equipment used while a musculoskeletal modeling approach will make it possible to evaluate the work and associated muscular efforts necessary to produce an optimal performance.

The realization of this project can be divided into the following steps:

- The application of biomechanical concepts to the analysis of the athlete in interaction with a deformable material during the realization of a movement:
 - Motion analysis on a whole body model,
 - Joint coordination and muscle,
 - Evaluation of internal and external efforts.

The establishment of a coupling model between a rigid multi-body system (human system) and a slender deformable structure (sports equipment), for example in the form of a 3D beam with a non-linear response. Special attention will be paid to the coupling resolution to integrate solution of the deformable system within the motion analysis solver. As a first step, a hybrid digital analytical approach will be considered.

- The identification of the global responses of the coupled system:
 - Evaluation of the energies involved and associated dissipations as well as the temporality of these energy transfers.
 - Intra-system and inter-system evaluations.
- The definition of optimality criteria for the interaction:
 - Optimization of material characteristics
 - Optimization of human movements (motor coordination, energy transfer between body segments, etc.)
 - Optimization and loadings (direction and intensity of effort) applied by the athlete.

The developments will be integrated in the OpenSource Platform [CusToM](#).

Candidate profile

We are looking for a candidate to prepare a doctoral thesis in the fall of 2019. The candidate must have a master's degree in biomechanics or mechanics and, if possible, to demonstrate skills in computer development and in numerical methods. Experience using experimental tools (motion capture, electromyography, force platforms) will be a real plus. A good level in international English will also be needed. A scientific curiosity and a taste for multidisciplinary work will also be appreciated.

Supervision

This project is carried out in a context of multidisciplinary research by:

- Georges Dumont, mechanical science, ENS Rennes (Georges.Dumont@ens-rennes.fr)
- Charles Pontonnier, mechanical science, ENS Rennes (Charles.Pontonnier@ens-rennes.fr)
- Nicolas Bideau, sports sciences, University of Rennes 2 (nicolas.bideau@univ-rennes2.fr)
- Guillaume Nicolas, sports sciences, University of Rennes 2 (guillaume.nicolas@univ-rennes2.fr)

This PhD thesis will be held at the École Normale Supérieure in Rennes (ENS Rennes) within the MimeTic project team (<https://team.inria.fr/mimetic/>) at IRISA (UMR 6074), Inria Brittany research centre and M2S (EA 7470).

Granting and salary

The thesis is granted by the Region Bretagne and Ecole Normale Supérieure de Rennes. The grant is of ~1350€ per month. The candidate will complete its salary with courses at ENS Rennes (64h per year), allowing an additional salary of ~300€ per month.

Link :

- <http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid76053/le-financement-doctoral.html>

Experimental platform & facilities

The IMMERMOME Immersive Room will be the main experimental platform used in this project, and has been partially funded under the latest Brittany State Plan Contract. It is carried in the framework of the Immerstar project by ENS Rennes, the University of Rennes 2, the University of Rennes, the INSA of Rennes and the INRIA Bretagne / Atlantique research center, all also associated with the IRISA UMR laboratory. 6074 whose team MimeTIC is one of the teams and also carried by the M2S (EA7470).

References

- Aleshinsky, S. Y. (1986a). An energy 'sources' and 'fractions' approach to the mechanical energy expenditure problem. II. Movement of the multi-link chain model. *J. Biomech.* 19, 295-300.
- Aleshinsky, S. Y. (1986b). An energy 'sources' and 'fractions' approach to the mechanical energy expenditure problem. IV. Criticism of the concept of 'energy transfers within and between links'. *J. Biomech.* 19, 307-309.
- Cavagna, G. A. and Kaneko, M. (1977). Mechanical work and efficiency in level walking and running. *J. Physiol.* 268, 467-481.
- Cavagna, G. A., Saibene, F. P. and Margaria, R. (1963). External work in walking. *J. Appl. Physiol.* 18, 1-9.
- Kautz, S. A. and Neptune, R. R. (2002). Biomechanical determinants of pedaling energetics: internal and external work are not independent. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 30, 159-165.
- A. Muller, C. Pontonnier, P. Puchaud and G. Dumont, (2019). CusToM: a Matlab toolbox for musculoskeletal simulation. *Journal of Open Source Software*, 4(33), 927, <https://doi.org/10.21105/joss.00927>
- A. Muller, C. Pontonnier and G. Dumont, (2018b), « MusIC method enhancement by a sensitivity study of its performance: Application to a lower limbs musculoskeletal model », *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 10 pages, 10.1080/10255842.2018.1541455.
- A. Muller, C. Pontonnier, G. Dumont, (2018a) « The MusIC method: a fast and quasi-optimal solution to the muscle forces estimation problem », *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 12 pages. doi: 10.1080/10255842.2018.1429596.
- Pouliquen C., Nicolas G., Bideau., Garo G., Megret A., Delamarche, P., Bideau N. (2018). Spatiotemporal analysis of 3D kinematic asymmetry in professional cycling during an incremental test to exhaustion. *J Sports Sci.* 36 (19), 2155-2163.
- Rajagopal A, Dembia CL, DeMers MS, Delp DD, Hicks JL, Delp SL (2016). Full-Body Musculoskeletal Model for Muscle-Driven Simulation of Human Gait. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2016 Oct;63(10):2068-79.

Sasaki, K. and Neptune, R. R. (2006). Muscle mechanical work and elastic energy utilization during walking and running near the preferred gait transition speed. *Gait & Posture* 23, 383-390.

van Ingen Schenau, G. J., van Woensel, W. W., Boots, P. J., Snackers, R. W. and de Groot, G. (1990). Determination and interpretation of mechanical power in human movement: application to ergometer cycling. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 61, 11-19.

Willems, P. A., Cavagna, G. A. and Heglund, N. C. (1995). External, internal and total work in human locomotion. *J. Exp. Biol.* 198, 379-393.

Winter, D. A. (1979). A new definition of mechanical work done in human movement. *J. Appl. Physiol.* 46, 79-83.