

# Proposition de Stage et Sujet de Thèse

## Approche thermodynamique hors d'équilibre de la production de puissance dans les systèmes vivants.

**Contacts** *eric.herbert@univ-paris-diderot.fr* et *christophe.goupil@univ-paris-diderot.fr*

**Site Web** *http://dyco.lied.univ-paris-diderot.fr/*

**Localisation** *Université de Paris, 35 rue H. Brion, 75013 Paris*

**Résumé du projet** Nous proposons de mettre à profit les mesures de Cost of Oxygen Transport (COT) lors de tests d'effort associés à une modélisation thermodynamique hors d'équilibre de la réponse musculaire. En s'appuyant sur les travaux menés par l'équipe [1, 2, 3] ce projet vise à mettre en place et valider une méthodologie de tests de cinq paramètres de mesure qui constituent une cartographie de la capacité d'un organisme vivant à fournir et à maintenir un effort. L'objectif du projet est à la fois méthodologique au sens où il fait référence à un modèle complet intégré, tout en restant au plus près de la pratique, en s'appuyant pour les développer, sur des protocoles robustes et largement employés, sur tapis de marche et sur vélo ergométrique.

La performance physique est de longue date un indicateur de la santé des individus. Qu'elle soit utilisée à des fins sportives ou de santé publique, les protocoles et les mesures qui en découlent permettent de définir des gabarits d'analyse. Les nombreux protocoles d'efforts existant aboutissent à ces résultats. Pour autant, dès lors que l'on souhaite rassembler ces résultats au sein d'une même description, il importe de fournir un cadre conceptuel commun. Dans cet esprit, il a récemment été proposé une modélisation thermodynamique de la réponse musculaire à l'effort. Cette approche, fondée sur une reconstruction thermodynamique du modèle du muscle de Hill [4], permet de définir cinq paramètres, qui se déclinent comme suit à l'échelle de l'organisme :

- L'intensité métabolique pour une production de déchet minimale par unité de longueur parcourue
- La puissance basale
- L'intensité métabolique au seuil de fatigue
- La force isométrique
- Le facteur de mérite métabolique

Cette méthodologie a été développée sur le plan théorique par l'équipe DyCo du LIED et a conduit à une description hors d'équilibre générique d'un système de conversion chimique en puissance mécanique récemment publiée [1]. La mesure de ces paramètres permet le raccordement entre les attendus d'une modélisation thermodynamique à temps finis d'une part et les observations physiologiques d'autre part. En termes de modélisation, la principale contrainte est celle de la minimisation du nombre de paramètres, tout en conservant un niveau de description pertinent. La confrontation avec l'expérience ne peut se faire que par des ajustements aux données, basées sur un jeu de paramètres réduit et physiquement pertinent. Ce modèle a été complété par une modélisation de la réponse du coût en oxygène associé à l'effort (Cost of Oxygen Transport, COT). La mesure de l'oxygène comme indicateur métabolique est une technique robuste largement répandue dans les centres hospitaliers et sportifs, comme dans les laboratoires sur différents organismes. Elle est ici mise à profit pour renseigner le flux de déchet énergétique issu de la conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique. Ces mesures de flux d'oxygène, divisées par la vitesse de déplacement du sujet (humain ou animal), déterminent le COT. Cette grandeur est directement associée à la production de déchet métabolique durant un effort unitaire, tel qu'une unité de longueur parcourue par exemple. Des travaux récents nous ont permis de valider l'ensemble de cette approche de modélisation en l'appliquant au cas du cheval, qui présente l'intéressante particularité de posséder plusieurs allures de déplacement

A ce jour aucune modélisation n'a permis de rassembler l'ensemble de ces résultats dans un même cadre. Nous proposons donc d'utiliser ce modèle pour rendre compte de la variabilité de ces paramètres dans une classe d'individus homogène d'une part et de l'évolution de ces paramètres en fonction de l'âge d'autre part.

Le **programme scientifique** prévu se compose d'un axe expérimental et un d'axe théorique qui se dérouleront en parallèle :

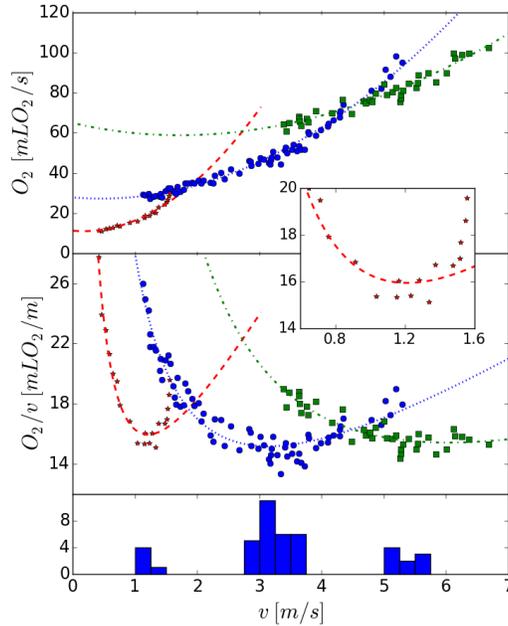


FIGURE 1 – Flux de consommation en oxygène  $O_2$  (en haut),  $COT = O_2/v$  (au milieu), dans le cas du déplacement d'un cheval aux trois allures : pas, trot et galop. On notera (histogramme du bas) que les vitesses préférentiellement choisies par l'individu laissé libre coïncident avec les minimas du COT pour chaque allure. Les courbes sont les ajustements aux données expérimentales, réalisés par le modèle thermodynamique, extrait de [3].

- Axe théorique. En s'appuyant sur les travaux menés au laboratoire [5], développement du formalisme associé aux transitoires et à la prise en compte de la totalité de l'impédance musculaire (active et réactive)
- Axe expérimental. (i) mise en place et le déroulement de protocoles de mesures stationnaires, (ii) développement d'un système permettant une mesure instantanée, incluant les transitoires, de l'impédance de sortie mécanique d'un sujet à l'effort.
  1. En collaboration avec l'APHP et l'INSEP : étude du COT à la marche et à la course en fonction de la vitesse et de l'inclinaison chez l'humain.
  2. En collaboration avec le Museum d'Histoire Naturelle, étude du COT chez l'animal
  3. Développement d'un vélo instrumenté pour mesures d'impédance de sortie mécanique.

**Compétences recherchées** Le doctorant devra montrer un goût pour le travail interdisciplinaire, en interaction avec différentes communautés de chercheurs. Un goût pour la thermodynamique hors équilibre et la connaissance de langages usuels tels que *Matlab* ou *Python* sont requises.

## Références

- [1] C. Goupil et al. *Thermodynamics of metabolic energy conversion under muscle load*. New J. Phys., 2019.
- [2] Goupil C., Herbert E. *Adapted or Adaptable : How to Manage Entropy Production ?* Entropy, 2020, 22
- [3] Herbert E. et al. *The thermodynamic bases of animal locomotion*. Submitted to Phys. Rev. Lett.
- [4] Hill, AV., The Heat of Shortening and the Dynamic Constants of Muscle. Proc. R. Soc. Lond. B 126, 843 (1938) : 136-95.
- [5] Thiébaud E. et al *Non-linear impedance spectroscopy for complete thermoelectric characterization : Beyond the  $zT$  estimation*. Journal of Applied Physics 124 (23), 235106 (2018)