

Proposition de stage M2 & thèse

Physique statistique expérimentale : Energétique stochastique à 2 dimensions et plus

Direction : Ludovic Bellon

Laboratoire : Laboratoire de Physique
ENS de Lyon et CNRS
46 allée d'Italie
69007 Lyon, FRANCE
<http://www.ens-lyon.fr/PHYSIQUE/>

Contact : Email : ludovic.bellon@ens-lyon.fr
Tél. : (+33) 4 26 23 39 56
Web : <http://perso.ens-lyon.fr/ludovic.bellon/>



Calendrier : proposition ouverte pour 2026

Projet de recherche :

La thermodynamique stochastique est une branche récente de la physique statistique, dont l'objet est de décrire les échanges d'énergie dans les systèmes mésoscopiques [1]. Cette approche consiste notamment à définir la notion de travail et de chaleur au niveau d'une trajectoire unique dans l'espace des phases, et à étudier la statistique a posteriori de ces observables [2]. On peut ainsi réaliser des moyennes d'ensemble pour retrouver les résultats de la thermodynamique, mais aussi étudier plus finement les propriétés statistiques des échanges d'énergie. L'égalité de Jarsynski [3] est par exemple un résultat théorique puissant qui transforme l'inégalité du second principe en une égalité, et permet de quantifier le caractère hors d'équilibre de transformations thermodynamiques. Nous pouvons par exemple observer des « violations » transitoires du second principe, lorsque les fluctuations thermiques jouent en notre faveur sur une expérience ponctuelle. Nos dernières expériences démontrent un cas extrême : une transformation qui augmente l'énergie d'un système gratuitement 95 % du temps, le coût énergétique des 5 % restants assurant la validité du second principe en moyenne [4].

Nos expériences lèvent un verrou expérimental pour étudier des oscillateurs sous-amortis [5-6] : le terme d'accélération, lié à l'inertie du système, n'est pas négligeable, et offre une richesse importante par le degré de liberté associé à la vitesse. Pour cela, nous mesurons finement les fluctuations de position d'un oscillateur micro-mécanique par interférométrie [7] (précision de 1pm, pour une amplitude de bruit thermique de 1nm), et modifions par rétroaction temps réel le potentiel d'énergie dans lequel il évolue. Face aux expériences traditionnelles (sur-amorties), l'intérêt de cette approche est multiple :

- Le couplage avec le bain thermique est faible et ajustable (facteurs de qualité de 10 à 10^5).
- Les temps caractéristiques sont courts (typiquement 1 ms ou moins), autorisant une grande statistique des mesures.
- La température est modulable sur une très large gamme (de 10 K à 1700 K).
- On s'approche de réalisations pratiques possibles avec des MEMS ou NEMS (micro- ou nano-systèmes électromagnétiques).
- La théorie se cantonne souvent aux systèmes 1D (sur-amortis), le champ de nos recherches est ainsi souvent vierge et propice à de nouvelles découvertes !

Nous réunissons ainsi toutes les conditions pour des mesures d'une précision inégalée dans ce domaine. Les axes d'explorations sont nombreux et très prometteurs : nous pouvons par exemple explorer l'énergie minimale nécessaire pour manipuler l'information dans des opérations logiques [8-12]. De nombreuses questions fondamentales ouvertes sur le lien entre information et échanges d'énergie sous-tendent notre approche expérimentale, et donnent lieu à des collaborations avec les experts internationaux du domaine : questions théoriques, optimisation des protocoles expérimentaux par IA [13], ouverture vers les questions de fluctuations quantiques.

Au delà de cette exploration du lien entre théorie de l'information et thermodynamique, nous nous pencherons sur les cycles thermodynamiques impliquant deux thermostats, comme le cycle de Carnot par exemple. Les étapes de compression/décompression correspondent à des changements de la raideur d'un potentiel harmonique. Les deux thermostats seront obtenus en chauffant le levier via un laser externe, opération dont nous avons une maîtrise poussée grâce à nos explorations antérieures [14,15]. Nous serons ainsi en mesure de tester les rendements de ces cycles thermodynamiques et les comparer aux limites théoriques, qu'elles soient les limites ultimes ou les limites à rendement maximal [16]. Nous étudierons également la possibilité d'extraire du travail vers un système externe. Le caractère résonant du système micro-mécanique est ici un atout de taille : les systèmes sur-amortis dépensent tout le travail produit immédiatement par dissipation visqueuse. La compréhension de ces moteurs stochastiques (chaque cycle est différent du précédent et les échanges d'énergie éminemment fluctuants) est notamment pertinente pour l'échelle des processus biologiques, où les énergies échangées sont proches de l'agitation thermique.

Pour finir, le système que nous utilisons est facilement répliquable pour coupler encore plus de degrés de liberté entre eux avec des interactions ajustables (couplage sur et sous amorti, asymétrique, etc.), offrant une perspective d'exploration de phénomènes riches et aux applications multiples.

Profil recherché et environnement :

Nos expériences offrent toute une palette pour permettre à une doctorante ou un doctorant d'exprimer sa créativité, et l'orientation du projet sera coconstruite en fonction des compétences et centres d'intérêts personnels sur nos questions. Une coloration très expérimentale est possible avec une évolution du système micromécanique, du système de pilotage par rétroaction en temps réel, et la mise en place d'une extraction du travail produit vers l'extérieur. Une coloration physique fondamentale avec une approche de modélisation analytique poussée serait bienvenue en continuité d'une partie importante de nos travaux. Une coloration traitement du signal, avec la définition et l'implémentation temps réel de protocoles via des réseaux de neurones artificiels est un également un axe prometteur que nous souhaitons renforcer. Des bases de physique statistique et une grande curiosité sont ainsi les seuls prérequis attendus !

Le groupe de recherche est composé de Ludovic Bellon (directeur de recherche), Caroline Crauste (chargée de recherche), tous deux HDR, et de Sergio Ciliberto (directeur de recherche émérite), et d'un nombre fluctuant de doctorant•e•s, post-doctorant•e•s et stagiaires (de 1 à 4 selon les années). Le sujet est porteur et l'expérience mature, aussi les perspectives de publications sont très bonnes. Nous portons une attention particulière à la participation de nos recrues aux conférences du domaine comme à leur ouverture thématique pour se constituer un réseau en préparation de leur future insertion professionnelle, dans le monde académique ou privé. Une gratification de stage M2 est disponible pour 6 mois, un financement de thèse reste à obtenir via un CDSN ou un contrat de l'École Doctorale PHAST.

References:

- [1] Ken Sekimoto. *Stochastic Energetics*, volume 799 of Lecture Notes in Physics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [2] Ken Sekimoto. *Langevin equation and thermodynamics*. Progress of Theoretical Physics Supplement, **130**,17, 1998.
- [3] C. Jarzynski, *Nonequilibrium equality for free energy differences*, Phys. Rev. Lett. **78**, 2690,1997
- [4] N. Barros, S. Ciliberto, L. Bellon. *Probabilistic work extraction on a classical oscillator beyond the second law*. Phys. Rev. Lett. **133**, 057101, 2024.
- [5] S. Dago, J. Pereda, S. Ciliberto, and L. Bellon. *Virtual double-well potential for an underdamped oscillator created by a feedback loop*, J. Stat. Mech. **2022**, 053209, 2022.
- [6] S. Dago, N. Barros, J. Pereda, S. Ciliberto, and L. Bellon. *Virtual potential created by a feedback loop: Taming the feedback demon to explore stochastic thermodynamics of underdamped systems*. In Xavier Bouju and Christian Joachim, editors, *Crossroad of Maxwell Demon*, page 115. Springer Nature Switzerland, 2024.
- [7] P. Paolino, F. Aguilar Sandoval and L. Bellon, Quadrature phase interferometer for high resolution force spectroscopy, Rev. Sci. Instrum. **84**, 095001, 2013.
- [8] S. Dago, J. Pereda, N. Barros, S. Ciliberto, and L. Bellon. *Information and thermodynamics: Fast and precise approach to Landauer's bound in an underdamped micromechanical oscillator*. Phys. Rev. Lett. **126**, 170601, 2021.
- [9] S. Dago and L. Bellon. *Dynamics of information erasure and extension of Landauer's bound to fast processes*, Phys. Rev. Lett. **128**, 070604, 2022.
- [10] S. Dago and L. Bellon. *Logical and thermodynamical reversibility: Optimized experimental implementation of the not operation*, Phys. Rev. E, **108**, L022101, 2023.
- [11] S. Dago, S. Ciliberto, and L. Bellon, *Adiabatic computing for optimal thermodynamic efficiency of information processing*, Proc. Nat. Acad. Sci. **120**, e2301742120, 2023.
- [12] S. Dago, S. Ciliberto, and L. Bellon. *Reliability and operation cost of underdamped memories during cyclic erasures*, Adv. Phys. Res. **3**, 2300074, 2024.
- [13] N. Barros, S. Whitelam, S. Ciliberto, L. Bellon, *Learning efficient erasure protocols for an underdamped memory*, Phys. Rev. Lett. **133**, 057101, 2024.
- [14] F. Aguilar Sandoval, M. Geitner, É. Bertin, and L. Bellon. *Resonance frequency shift of strongly heated micro-cantilevers*. Journal of Applied Physics, **117**, 234503, 2015.
- [15] B. Pottier, F. Aguilar Sandoval, M. Geitner, F. Melo, and L. Bellon. *Silicon cantilevers locally heated from 300 K up to the melting point: Temperature profile measurement from their resonance frequencies shift*, J. Appl. Phys. **129**, 184503, 2021.
- [16] T. Schmiedl and U. Seifert. *Efficiency at maximum power: An analytically solvable model for stochastic heat engines*. EPL (Europhysics Letters), **81**, 20003, 2007.