


# PROPOSITION D'ANTOINE BÉRUT AUX PRIX SAINT GOBAIN & DANIEL GUINIER

1<sup>er</sup> février 2016

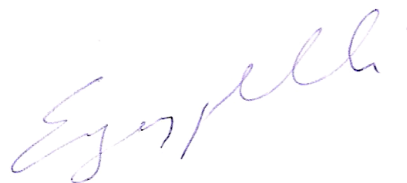
Nous, Sergio Ciliberto (Directeur de thèse d'Antoine Bérut et membre de son jury) et Élisabeth Guazzelli (Présidente du jury de thèse d'Antoine Bérut) soutenons très fortement la nomination d'Antoine Bérut aux prix Saint Gobain et/ou Daniel Guinier de la Société Française de Physique.

Antoine Bérut a étudié expérimentalement, par des systèmes de piégeage optique de particules colloïdales, plusieurs aspect fondamentaux de la thermodynamique stochastique. Il a d'abord commencé par une mesure particulièrement complexe relative au principe de Landauer, principe formulé dans les années 1970 mais jamais vérifié expérimentalement. Pour effectuer cette mesure, Antoine Bérut a utilisé une particule colloïdale piégée dans un potentiel à deux puits comme une mémoire à un bit, et il a pu démontrer expérimentalement que l'énergie minimale pour effacer un bit est celle prédite par Landauer. Ce résultat a été publié par la prestigieuse revue *Nature* et a été sélectionné par le magazine *Physics World* parmi les 10 découvertes principales de l'année 2012. Sur ce sujet, il a ensuite publié d'autres articles sur l'équivalence entre le principe de Landauer et l'égalité de Jarzinsky. L'article publié dans *Europhysics Letters* a été parmi les *Highlights* de la revue en 2013. Mais Antoine Bérut ne s'est pas arrêté là. Il a travaillé aussi sur le vieillissement de gels où il a remarqué des anomalies sur le traitement des données qui pouvaient conduire à une mauvaise interprétation des observations. Il s'est intéressé aussi à l'interaction et au transfert d'énergie entre particules Browniennes piégées. Il a fait des observations très originales qui ont données lieu à des publication dans *Europhysics Letters*, *Physical Review Letters* et *Journal of Statistical Mechanics*.

En conclusion, la thèse d'Antoine Bérut (soutenue le 7 juillet 2015) sur les **interactions et fluctuations de particules browniennes piégées par des pinces optiques** est remarquable non seulement par la quantité des sujets abordés mais aussi par l'excellence des résultats obtenus. Ce travail a déjà reçu une reconnaissance internationale comme en témoigne ses publications (8 articles) dans des revues de très haut niveaux qui sont déjà abondamment citées. Nous pensons qu'Antoine Bérut mérite certainement le prix Saint Gobain ou Daniel Guinier de la Société Française de Physique.



Sergio Ciliberto, Directeur de Recherche CNRS  
Laboratoire de Physique de l'ENS de Lyon



Élisabeth Guazzelli, Directeur de Recherche CNRS  
Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI UMR 7343

# Antoine BÉRUT

22 rue Flégier,  
13001 Marseille

☎ 06 77 06 03 97

✉ antoine.berut@univ-amu.fr

## Cursus universitaire :

---

- 2015/2016 :** **Post-doctorat** au laboratoire IUSTI ([UMR 7343](#)) sur le projet ERC Plantmove sous la direction de Yoël Forterre.
- 2012/2015 :** **Thèse de doctorat** : "Interactions et fluctuations de particules Browniennes dans un réseau de pièges optique", au Laboratoire de Physique de l'ENS Lyon ([UMR 5672](#)), sous la direction de Sergio Ciliberto et Artyom Petrosyan. Thèse soutenue le 7 juillet 2015 (manuscrit disponible sur les archives de [TEL-HAL](#)).
- 2012 :** Admis à l'**Agrégation de Sciences Physiques**, option Physique (classé 5<sup>ème</sup> sur 75 postes).
- 2011/2012 :** Préparation au concours de l'agrégation à l'ENS de Lyon.
- 2010/2011 :** **M2** Physique Fondamentale, cursus Physique Hors Équilibre, à l'ENS de Lyon, mention Très Bien.
- 2008/2010 :** **L3** et **M1** de Physique Fondamentale au département Sciences de la Matière de l'ENS de Lyon, mention Bien.
- 2006/2008 :** **Classes préparatoires** PCSI puis PC\* au Lycée Henri IV (Paris, Vème).

## Expérience professionnelle :

---

### Recherche :

- Avril à Juillet 2011 :** Stage de M2 au Laboratoire de Physique de l'ENS Lyon. Encadrants : S. Ciliberto et A. Petrosyan.
- Mai à Juillet 2010 :** Stage de M1 à l'Institut Max Planck für Dynamik und Selbstorganisation (Göttingen). Encadrant : M. Gibert.
- Juin et Juillet 2009 :** Stage de L3 à l'Institut Langevin (ESPCI, Paris). Encadrante : C. Prada-Julia.

### Enseignement :

- Activité Complémentaire d'Enseignement** dans le cadre de la thèse (64h00/an) : TD du cours Ondes et Optiques (L3) et interventions dans les préparations aux agrégations de Physique et de Chimie de l'ENS de Lyon (TP d'optique et d'électronique, corrections de montages et de leçons de physique). Participation aux jurys de stages d'élèves de L3.
- 2008/2009 :** soutien scolaire bénévole avec une association pour des élèves de 1<sup>ère</sup> S d'un lycée Zep de Vaulx-en-Velin.

### Médiation scientifique :

- 2014, 2013 et 2012 :** Participation à la Fête de la Science à l'ENS de Lyon (préparation et animation d'un stand d'optique, d'électromagnétisme et d'électronique).
- 2013 :** encadrement de deux élèves de 1<sup>ère</sup> S pendant 3 jours dans le cadre du module de formation professionnelle « Accueillir un jeune dans son laboratoire » de l'Université de Lyon.
- 2010/2011 :** Co-présentation d'une rubrique scientifique sur Trensistor, la webradio des étudiants de l'ENS Lyon.

## Publications scientifiques

---

- Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics*, A. Bérut, A. Arakelyan, A. Petrosyan, S. Ciliberto, R. Dillenschneider & E. Lutz. *Nature* **483**, 187-189 (08 March 2012).  
Cet article a été sélectionné par le magazine [Physics World](#) dans son [top 10](#) des découvertes de l'année 2012.
- Simultaneous 3D measurement of the translation and rotation of finite size particles and the flow field in a fully developed turbulent water flow*, S. Klein, M. Gibert, A. Bérut & E. Bodenschatz. *Meas. Sci. Technol.* **24**, 024006 (2013)
- Detailed Jarzynski Equality applied on a Logically Irreversible Procedure*, A. Bérut, A. Petrosyan & S. Ciliberto. *EPL* **103**, 60002 (2013). Cet article a fait partie des [Highlights 2013](#) de la revue EPL.
- Energy flow between two hydrodynamically coupled particles kept at different effective temperatures*, A. Bérut, A. Petrosyan & S. Ciliberto. *EPL* **107**, 60004 (2014)
- Information and thermodynamics: experimental verification of Landauer's Erasure principle*, A. Bérut, A. Petrosyan & S. Ciliberto. *J. Stat. Mech.* (2015) P06015
- Fluctuations in an aging system: the absence of an effective temperature in the sol-gel transition of a quenched gelatin sample*, A. Bérut, A. Petrosyan, J. R. Gomez-Solano & S. Ciliberto. *J. Stat. Mech.* (2015) P10020
- Stationary and transient Fluctuation Theorems for effective heat flux between hydrodynamically coupled particles in optical traps*, A. Bérut, A. Imparato, A. Petrosyan & S. Ciliberto. Accepté pour publication dans *PRL* (11/01/2016).
- The role of coupling on the statistical properties of the energy fluxes between stochastic systems at different temperatures*, A. Bérut, A. Imparato, A. Petrosyan S. Ciliberto. Accepté pour publication dans *J. Stat. Mech* (18/01/2016).

**Report by Dr. Massimiliano Esposito**  
**on the PhD thesis of Mr. Antoine BERUT:**

**“Fluctuations and Interactions of Brownian Particles**  
**in Multiple Optical Traps”**

**Background:**

During the last decade significant progress has been achieved in the understanding of thermodynamics and statistical mechanics of small devices. This progress has been theoretical as well as experimental. Due to the large relative magnitude of thermal fluctuations compared to the characteristic energies of these small devices, their motion and energetics become highly fluctuating and need to be characterized statistically. Remarkable results have been obtained, such as fluctuation theorems which generalize to far-from-equilibrium situations results previously restricted to the vicinity of equilibrium such as linear response theories. This new body of knowledge, nowadays often called stochastic thermodynamics, has also been shown to display important connections with information theory. Optical tweezers were used in many of the important experimental setup build to verify this new theory. They nowadays play a crucial role for manipulating small systems. The PhD thesis of Mr. Antoine Bérut report new experimental studies based on trapping Brownian particles with optical tweezers, exploiting in particular various types of interactions between two traps.

**Summary of the thesis:**

*Chapter 1* presents a nice introduction to the key experimental and theoretical concepts that are needed to understand the rest of the thesis. It starts with an introduction on the working principles of optical tweezers. The experimental setup, the sample preparation and the calibration procedure is then described. Basic elements of the theory of stochastic thermodynamics based on a Langevin dynamics are also presented. Overall, despite its small size, I found this introductory chapter very comprehensible and pleasant to read.

*Chapter 2* is dedicated to the first experimental verification of the Landauer principle which predicts that the erasure of a bit of information produces in average at least  $kT \cdot \log 2$  of heat. By combining the effect of two optical traps, a Brownian particle was trapped in a double well potential which can be deformed using a viscous drag force into a single well potential to implement the so-called reset-to-zero operation that was originally proposed by Landauer. The erasure process has to be performed reversibly (i.e. very slowly) in order to minimize the average heat produced and to reach the bound predicted by Landauer. When implemented in finite-time, a correction scaling as the inverse of the duration of the process has been predicted theoretically. The experiments by Mr. Antoine Bérut nicely confirm this prediction and manage to get quite close to the Landauer bound. Heat as well as work fluctuations during the erasure process are also studied and their full probability distribution was measured. The work distribution is shown to satisfy the predictions of a slightly modified version of the work fluctuations theorem (Jarzynski equality for nonequilibrium instead of equilibrium initial conditions). The presentation of this part of the thesis is again very good and

the results obtained are very conclusive and very important.

*Chapter 3* is concerned with the experimental study of a sol-gel transition in gelatin using the fluctuating properties of an in beaded Brownian particle trapped by an optical tweeter when a fast quench in temperature across the transition is performed. After briefly introducing the phenomenology of the sol-gel transition, the results of similar experiments that had been previously performed by the same group are summarized. They reported that the variance of the position distribution displays a fast anomalous increase right after the quench and that the fluctuation-dissipation relation was violated. Since the system is not at steady-state but in a regime of transient relaxation, a detailed analysis of the difference between ensemble- and time-averages is done to reach the conclusion that these previous studies saw artifacts. In reality the position fluctuations are Gaussian and satisfy an equipartition corresponding to the real temperature of the sample. The fluctuation-dissipation relation is therefore found to be satisfied.

*Chapter 4* studies two Brownian particles each in two different optical traps and coupled via hydrodynamic interactions. Such a coupling acts at the level of the diffusion matrix (dissipative coupling) rather than at the level of the potential (conservative coupling). To drive the system out of equilibrium, one of the particle is subjected to a Gaussian noise generated by an acousto-optic deflector which mimics a very high temperature. Correlations in position between the two particles are studied in detail and found to be in good agreement with theoretical predictions. The statistics of the heat exchanged between the two particles is also measured. The heat exchange fluctuation theorem which should hold for two particles in contact with two heat baths at different temperature was tested but seems (at least partially) not satisfied although the results are inconclusive due to too large error bars.

*Chapter 5* presents some preliminary work to study the fluctuating properties of a Brownian particle subjected to a shear flow generating no net motion but a source of colored noise. Most of the chapter focuses on the protocol used to build a microfluidic device enabling to do such a study. An important problem that has been overcome is using gravity instead of pumps to drive the shear because the latter generate too much background noise. Preliminary data suggests, as expected, a breakdown of the fluctuation-dissipation relation. An attempt to mimic some aspects of the colored noise generated by the shear flow using an acousto-optic deflector which modulates the position of the trap is also described.

### **Global assessment:**

Overall this thesis presents timely and good quality research which meets international standards. The results presented in chapter 2 are probably the most important and the most convincing. The fact that they represent the first experimental verification of the famous Landauer principle naturally add to their appeal. Chapter 3, studies an interesting and difficult problem. The main result is that the fluctuation-dissipation relation at the real temperature of the sample is satisfied. This result is valuable because it disproves the existence of anomalous regimes of relaxation previously observed in analyzing similar experiments. Chapter 4 studies a very interesting setup and very nice results were found. The study could probably have been investigated further. I was slightly missing a more in-depth analysis of the stochastic thermodynamics of the capacitive coupling and a better explanation of why the heat exchange fluctuation theorem seems to fail. Maybe this simply reflects the fact that no

detailed theoretical work has been done on this topic. Chapter 5 presents preliminary work which may become very interesting but is still quite incomplete at the present stage.

Overall I found the thesis very well written and the quality of the presentation very good.

I believe therefore that the quality of this work is more than sufficient to award to Mr Antoine Bérut the title of doctor.

Luxembourg, June 5, 2015.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'A. Bérut', written in a cursive style.



Le 04 Juin 2015

Madame, Monsieur,

Le manuscrit de thèse de Monsieur Antoine Berut comporte cinq chapitres principaux, pour une centaine de pages en tout. Il est écrit en anglais, ce qui est un choix qui se justifie par la future dissémination que ce travail aura certainement, eu égard à ses mérites évidents : grande clarté de l'argumentation, expériences aux limites du savoir-faire actuel, thématique scientifique en plein essor actuellement, et capacité à présenter des résultats importants sous une forme concise tout en gardant un regard critique sur les aspects interprétatifs et/ou les travaux qu'il serait souhaitable de mener pour poursuivre les investigations.

Le premier chapitre est une introduction présentant les outils expérimentaux (pièges optiques) et théoriques (thermodynamique stochastique) qui seront utilisés dans les chapitres ultérieurs.

Le second chapitre est dédié à l'étude expérimentale du principe de Landauer qui stipule que toute action entraînant une modification irréversible de l'information (classique) que l'on a sur un système s'accompagne forcément d'un dégagement de chaleur valant au moins  $k_B T \ln(2)$  par bit d'information. Cette prédiction a été testée par Monsieur Antoine Berut grâce à un dispositif ingénieux piégeant une particule micrométrique dans un piège optique à double puits, et appliquant une force de friction visqueuse sur la particule grâce à un déplacement de la cellule par rapport au piège optique. Ainsi la particule se retrouve irréversiblement poussée vers le puits en aval de l'écoulement vu par la particule. La trajectoire de la particule étant mesurée au cours du temps, on peut alors calculer l'intégrale temporelle donnant accès à la chaleur dissipée et faire des moyennes d'ensemble. Un des résultats frappants est que, pour les procédures suffisamment lentes, la chaleur dissipée est égale au minimum prévu par le principe de Landauer, ce qui est un résultat d'autant plus important qu'il est accompagné par une discussion lumineuse sur les histogrammes de chaleur dissipée, montrant bien que le principe de Landauer n'est atteint que grâce aux trajectoires qui modifient irréversiblement l'information SANS dissiper de chaleur. Ce chapitre se clôt sur un test de divers théorèmes de Fluctuations.

Le troisième chapitre porte sur l'étude des propriétés statistiques de billes piégées dans de la gélatine brutalement refroidie au-dessous de sa température de transition sol-gel. Grâce à un travail minutieux (avec deux montages complémentaires) et à une analyse très approfondie des trois façons possibles de calculer les variances des fluctuations de position de la bille, Monsieur Antoine Berut démontre sans ambiguïté que les billes sont en équilibre avec le thermostat à tout instant après la trempe, y compris dans l'intervalle de temps initial où des travaux antérieurs avaient reporté des variances anormalement grandes, synonymes de température effective  $T_{eff}$  supérieure à la température  $T$  du thermostat. En particulier, il est montré que la présence d'une petite dérive initiale dans la position de la bille juste après la trempe a joué un rôle indu dans l'existence de ces températures effectives. Seules les moyennes d'ensembles réalisées à chaque instant sur un grand nombre d'expériences identiquement répétées peuvent permettre une évaluation pertinente de la variance des déplacements. Cette conclusion est soutenue par une étude poussée des statistiques d'ensemble telles que les histogrammes complets de la position des billes.

Le quatrième chapitre étudie un système de deux billes optiquement piégées à une distance de quelques microns l'une de l'autre, avec un forçage aléatoire de la position du premier piège optique qui produit une force aléatoire sur ladite particule. Monsieur Antoine Berut montre alors par des analyses du spectre de bruit que ce forçage aléatoire est bel et bien équivalent à une température effective pour la bille sollicitée. Il s'agit alors de comprendre les effets que cette température effective a sur la seconde bille : pour ce faire les diverses variances mesurées dans l'expérience sont comparées à un modèle de deux équations de Langevin couplées, dont Monsieur Antoine Berut expose très clairement la solution. Ce modèle rend compte de façon satisfaisante de l'essentiel des résultats expérimentaux, y compris pour le comportement de la quantité de chaleur échangée entre les deux particules. A la fin du chapitre, les données expérimentales sont utilisées pour tester le théorème de Fluctuation relatif au rapport des probabilités d'échanger une chaleur  $Q$  ou bien son opposé. Monsieur Antoine Berut montre très clairement que, même si les barres d'erreurs expérimentales empêchent d'être parfaitement

conclusif, le théorème de Fluctuation est compatible avec l'expérience, surtout aux valeurs de  $\Delta T$  les moins fortes. Ceci ouvre la voie à des approfondissements ultérieurs.

Enfin le cinquième chapitre porte sur les propriétés d'une bille optiquement piégée soumise à un écoulement de cisaillement. L'idée est d'étudier les fluctuations de positions de la bille pour savoir si cet écoulement de cisaillement est équivalent à une température effective. La réalisation expérimentale de la cellule microfluidique spécialement conçue pour cette expérience est très bien exposée dans le chapitre. Sa réalisation étant plus longue que prévu, les premiers résultats expérimentaux présentés sont ceux obtenus avec un écoulement de cisaillement « effectif » obtenu par variation aléatoire de la position du piège optique. Monsieur Antoine Berut montre que le spectre de fluctuation de position de la bille est bien modifié dans la direction où la position du piège est variée, contrairement à la direction perpendiculaire. Cet effet viole le théorème de Fluctuation-Dissipation, ce qui est compréhensible dans un tel système hors équilibre. Cependant ceci ne peut pas s'exprimer en termes de température effective, car le lien entre réponse et autocorrélation n'est pas tout à fait linéaire. Le chapitre se conclue par de premiers aperçus sur les résultats encourageants obtenus dans la cellule de microfluidique.

Comme indiqué au début de ce rapport, le manuscrit de thèse de Monsieur Antoine Bérut est de très grande qualité, aussi bien par l'ampleur et l'originalité des travaux entrepris, que par le caractère très significatif des résultats obtenus. Il est bien évident que cette thèse mérite d'être soutenue sans délai, et qu'elle comptera parmi les travaux de référence du domaine.



François LADIEU  
Responsable du groupe SPHYNX au CEA/SPEC.

# Rapport de Soutenance du Président de jury

Après la Soutenance de Thèse, le Président du jury inscrit à la fin du rapport de soutenance la mention décernée.

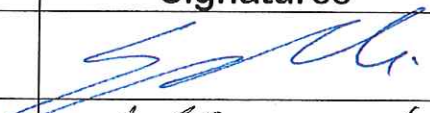
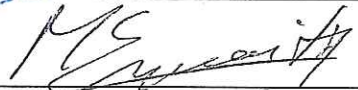

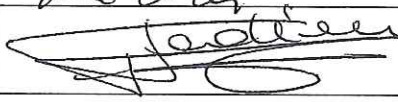
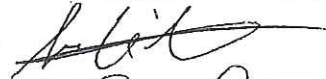
Antoine Béaut a fait une présentation à la fois claire, concise et pédagogique de ses travaux de thèse sur les fluctuations et interactions de particules browniennes dans des pièges optiques multiples. Son exposé illustre parfaitement l'originalité et le haut niveau de ses travaux de recherche qui font date : première vérification expérimentale du principe de Landauer et première mesure de l'énergie échangée entre deux particules browniennes tenues à deux températures différentes. Dans l'ensemble de la soutenance et en particulier lors de la discussion et des réponses aux questions, le jury a apprécié les multiples qualités de chercheur d'Antoine Béaut, notamment la rigueur et profondeur de son propos, sa capacité de sens critique et sa maturité et autonomie scientifique manifestes. Le jury lui accorde donc à l'unanimité le grade de Docteur de l'Université de Lyon avec la mention très honorable.



Mention décernée :

Très Honorable

Signatures de tous les membres du jury

Noms	Prénoms	Signatures
GUAZZELLI	Elizabeth	
ESPOSITO	MASSIMILIANO	
SEKIMOTO	Ken	
LADIEU	François	
CILIBERTO	SERGIO	
PETROSYAN	ARTYOM	