

**Rapport d'activité (2006-2009)**  
**de**  
**Sergio Ciliberto**

Activité d'enseignement.....	2
Encadrement de thèses.....	2
Activités administratives et responsabilités collectives .....	2
Activité de diffusion de connaissances .....	3
Participation à congrès.....	3
Activité de Recherche.....	5
Liste des publications dans les revues à comité de lecture.....	8

## **Activité d'enseignement**

- 1) Correction de montages à l'Agrégation de Physique de l'ENSL (entre 8 et 10 montages par an)
- 2) Cours de M1 à l'ENSL, ' Approche expérimentale à la physique' , 24 heures/an) (depuis 2004). J'ai eu l'idée de ce cours avec Bernard Castaing. Il s'agit d'analyser avec les étudiants les expériences importantes qui ont marqué l'histoire de la physique. On analyse en détail et d'une façon assez critique par exemple l'expérience de Cavendish, de Michelson de Millikan, de Perrin, mais on discute aussi la mesure de l'équivalence entre masse inertielle et gravitationnelle et les mesures qui ont montré les effets prédits par la relativité générale et restreinte. Nous essayons de montrer aux étudiants l'importance de la connexion entre expérience et théorie sur les développements de la physique. La préparation de ce cours m'a demandé une recherche bibliographique très intéressante que j'ai essayé d'organiser pour les étudiants. Il semble que un certain nombre d'étudiants soit intéressé à ce cours, toutefois je veux améliorer la présentation pour donner au cours une forme plus organisée que l'actuelle.
- 3) Cours de physique Statistique expérimentale au M2 de Physique Statistique de l'ENSL. (15 h/an) . Ce cours est aussi nouveau et l'esprit est très similaire à celui de M1 mais plus centré sur les développements très récents en physique statistique. Par exemple les théorèmes de fluctuation, le vieillissement, les fluides complexes.
- 4) Encadrement de projets expérimentaux pour L3 et M1.(31h/an)

## **Encadrement de thèse et de post-doct**

Co-direction de deux thèses.

- 1) Pierre Cortet, " Dynamique d'une fracture quasi statique " . co-direction avec L.Vanel.
- 2) Sylvain Joubbaud, " Dynamique de systèmes hors équilibre " , co-direction avec N. Garnier.
- 3) Ruben Gomez Solano, " Fluctuations d'une particule Brownienne dans un fluide hors équilibre", en cours.
- 4) Aude Casserieu," Fluctuations hors d'équilibre près d'un point critique", en cours.

Encadrement de deux post-doct

- 1) Pierre Jop, post-doct d'un contrat ANR
- 2) Debjani Bagchi, post doct d'un contrat de collaboration (MIRA) entre l'ENSL et l'IIS en Bangalore

## **Activités administratives et responsabilités collectives**

1) Responsabilité des contrats suivants:

- ANR 2005, SLLOCDYN, sur la dynamique vitreuse. En collaboration avec l'UCBL et le CRPP de Bordeaux.
- Contrat MIRA de collaboration avec l' " Indian Institute of Science " (IISc) de Bangalore.

- 3) Referee de plusieurs journaux internationaux: Physical Review Letters, Physical Review E, European Physical Journal, Physics Letters, Europhysics Letters, Physics of Fluids,
- 4) Editeur associé du "Journal of Statistical Mechanics : Theory and Experiment"
- 5) Membre des commissions de spécialistes de physique de l'ENSL et de l'UCB-Lyon I.
- 6) Membre du panel PA3 pour l'évaluation des "Starting grants" de l'ERC (depuis 2008).
- 7) Membre élu du conseil scientifique de l'ENS de Lyon.

### **Activité de diffusion des connaissances**

Organisation de trois conférences internationales:

"Statistical Physics of Systems out of Equilibrium", Trimestre thématique à l'IHP, (septembre-décembre 2007); Co-organisateurs : H. van Beijeren, G. Casati, J. Farago, H. Posch, H. Spohn, F. van Wijland

Co-Organisateur avec G. Boffetta, A. Celani, J. P. Eckmann du "V Seminaire Transalpin de Physique" sur "Dynamics and statistics in complex systems", Turin, mars 2007.

"Unsolved Problem on Noise 2008", ENS de Lyon, juin 2008. Co-organisateurs: E. Bertin, L. Bellon, S. Roux, L. Vanel.

"International Conference on Complexity in Physics" ENS de Lyon, Juin 2009. Co-organisateurs: Patrice Abry, Benjamin Audit, Sébastien Manneville and Stéphane Roux

### **Participation à des Écoles et Congrès**

(La liste ne comprend que les conférences invitées.)

- 1) The Principles of Dynamics of Non-Equilibrium Systems, Newton Institute (Cambridge), Janvier-juin (2006) Organisateurs : Martin Evans, Silvio Franz, Claude Godreche David Mukamel
- 2) Statistical Physics in Mechanics, Grass (France), June 2006, Organisateurs : Daniel Bonamy, Damien Vandembroucq and Elisabeth Bouchaud.
- 3) Dynamical Chaos and Non-equilibrium Statistical Mechanics, Singapour, août 2006, Organisateurs: G. Casati, L. Bunimovich, G. Zaslavsky.
- 4) Fluctuation Dissipation Theorems far from Equilibrium, mars 2006, Camerino (Italie), Organisateur: F. Marchesoni.
- 5) Journées de Physique Statistique, Conférence Plénière, Paris (FRANCE), Janvier 2006
- 6) Work dissipation and fluctuations in non-equilibrium physics, Bruxelles, mars 2006, Organisateurs: P. Gaspard, B. Deridda, C. Van der Broeck

- 7) Workshop on Non Equilibrium Phenomena in Supercooled Fluids, Glasses and Amorphous Materials, Pise ( ITALIE ), septembre 2006.Organisateurs: M. Tosi, M. Giordano, D. Leporini.
- 8) Workshop on ‘ Fracture and turbulence ‘, Weizmann institute, mars 2007.  
Organisateur: I. Procaccia.
- 9) Summer School in Complexity Science, Wye College 9-17 juillet 2007. Organisateurs: K. Christensen and H. Jensen.
- 10) 11ème rencontre du non-linéaire, 25-27 Mars 2008, IHP (Paris). Organisateur : M. Lefranc
- 11) Non-equilibrium phenomena; stationary measures and their properties, 16-22 février 2008, CIRM (Marseille). Organisateurs: P. Picco , S. Vaienti, C. Liverani, S. Olla
- 12) XIV Workshop on Statistical Mechanics and Non Perturbative Field Theory, 3-5 septembre 2008, Bari (Italie). Oragnisateur: G. Gonnella.
- 13) Many-Body Systems far from Equilibrium: Fluctuations, Slow Dynamics and Long-Range Interactions, 16-22 février 2009. Organisateurs: M. Henkel, D. Mukamel, M. Pleimling, G. Schütz
- 14) Unraveling the structure of biomolecules: from nonequilibrium statistical mechanics to mechanical manipulation, 16-18 février 2009, Organisateurs : Torcini, A. Imparato
- 15) IIS Centenary conference : Frontiers and Directions in Condensed Matter Physics, Bangalore 25 –29 May 2009, Organizateurs : C. Dasgupta, S. Ramaswamy.

## **Activité de Recherche (2006-2009)**

### **I. Introduction**

Pendant ces quatre années je me suis concentré sur l'étude du vieillissement des matériaux amorphes, la prédiction de la fracture dans un matériau hétérogène et les fluctuations dans les systèmes hors équilibre. Ce dernier sujet est très intéressant parce qu'il me permet de faire un lien entre mes compétences sur les systèmes dynamiques et mes études sur le vieillissement. Je résume ici les résultats que nous avons obtenus.

### **II. Fracture des matériaux hétérogènes : propriétés statistiques**

Avec L. Vanel et S. Santucci, nous avons développé un modèle à 2 dimensions qui permet de calculer la vitesse d'avancement de la fissure et de comparer les résultats numériques et analytiques avec une expérience de fracture de film. En particulier nous nous sommes intéressés à la rupture d'une feuille de papier, dans lequel la rupture est fragile presque bidimensionnel. Les résultats expérimentaux sont donc facilement comparables à ceux du modèle 2D [1,7]. Nous avons montré que la dynamique de la fracture dans le papier est très bien décrite par notre modèle de fluctuations statistiques des contraintes à l'équilibre thermodynamique. Nous montrons aussi l'existence d'états métastables, qui permettent de comprendre la nature intrinsèquement irréversible du processus de rupture. Nous observons la dynamique de croissance de la fissure se fait par sauts de la fissure dont la distribution de tailles est prédite assez bien par notre modèle d'activation thermique. Pour comprendre le rôle de la plasticité sur ces problèmes de fracture thermiquement activée nous étudions (en collaboration avec P. Cortet) la rupture dans des films de polycarbonate [10], dans lesquels nous observons un comportement très différent que celui des matériaux fragiles comme le papier [1,7]. Les études approfondies sur la dynamique de la fissure dans le polycarbonate ont conduit à une interprétation des données qui a permis de faire une distinction assez claire entre la dynamique élastique et plastique de la propagation de la fissure [10,17]. Cette interprétation semble être cohérente avec les nouveaux développements théoriques de J. Langer, I. Procaccia and Buchbinder. Ces résultats ouvrent des nombreuses perspectives pour les développements futures.

En parallèle à ces études expérimentales nous étudions théoriquement le rôle du désordre sur les modèles d'activation [2,3]. Nous avons effectué aussi de mesures sur les mousses polymère dans lesquelles le désordre peut être facilement contrôlé. Sur ce sujet nous avons établi une collaboration fructueuse avec des chercheurs de l'INSA de Lyon qui sont intéressé aux applications des nos résultats. Ces mousses ont été étudié par des techniques d'émission acoustiques, qui permettent de mesurer la distribution spatio-temporelle des microfissures qui précèdent la fracture finale [18].

Sur le sujet de la fracture viscoélastique et sur la fracture dans les milieux hétérogènes nous avons récemment écrit deux articles de revue [25,26]

### **III Vieillissement des matériaux amorphes**

Un gel pendant la phase de transition sol-gel ou un polymère après une trempe présentent une dynamique de relaxation vers l'équilibre, qui, dans certains conditions, peut être très lente, c'est-à-dire ces matériaux vieillissent. Nous étudions plusieurs aspects du vieillissement des matériaux amorphes et en particulier nous nous intéressons à l'évolution du bruit thermique de ces matériaux qui sont faiblement mais durablement hors équilibre.

En particulier nous avons mesuré les fluctuations thermiques associées aux propriétés électriques et mécaniques d'un polymère (polycarbonate) et nous avons estimé une

température effective  $T_{\text{eff}}$  via le rapport de fluctuation dissipation. La mesure de  $T_{\text{eff}}$  sur les propriétés diélectrique du polycarbonate après une trempe sous la température de transition vitreuse montre que le théorème de fluctuation dissipation (FDT) est fortement violé. L'amplitude et la persistance dans le temps de cette violation sont des fonctions décroissantes de la fréquence et du temps. L'origine de la violation est due à une dynamique fortement intermittente caractérisée par de grandes fluctuations avec une statistique non-Gaussienne. Les propriétés statistiques de ces signaux intermittents dépendent de la vitesse de la trempe. Toutefois les mécanismes physiques de cette intermittence sont mal compris et pendant ces quatre ans, en collaboration avec A. Naert et D. Bagchi(post-doct MIRA), nous avons développé et amélioré ultérieurement nos techniques de mesure pour éclaircir ce problème. Les mesures sont en cours.

#### **IV. Fluctuations dans les systèmes hors équilibre.**

Je me suis intéressé à l'application des théorèmes de fluctuations (FT) a plusieurs systèmes expérimentaux. Les FTs ont été développés d'abord dans le cadre des systèmes dynamique et après pour les systèmes stochastiques. Ils donnent une relation entre les probabilités d'observer une fluctuation positive ou négative du taux de production d'entropie d'un système hors équilibre.

##### **IV a) Les théorèmes de fluctuation dans les systèmes stochastiques.**

. Nous avons utilisé notre interféromètre, qui permet de mesurer des déplacements de l'ordre de  $10^{-13}$ m, pour étudier expérimentalement et théoriquement les fluctuations du travail injecté et dissipé par un oscillateur harmonique. La dynamique est bien décrite par des équations de Langevin du deuxième ordre et les résultats de nos mesures ont permis d'avoir un cadre théorique plus précis pour les théorèmes de fluctuation pour les états stationnaires et transitoires [4,8,9,12]. Enfin, inspirés par un travail de Seifert, nous avons montré que pour les fluctuations d'entropie totale le théorème de fluctuation stationnaire n'est pas valable uniquement pour les longs temps, comme dans le cas du travail injecté et de la chaleur dissipée, mais pour tous les temps [13].

##### **IV-b) Les fluctuations au point critique : Effet de taille finie et vieillissement au point critique.**

En 2007, en collaboration avec S. Joubaud et A. Petrosyan nous avons monté une nouvelle expérience, qui a commencé à donner des résultats très intéressants. Nous avons compris que la grande sensibilité de notre système de mesure, basé sur l'interférométrie de polarisation et déjà utilisé pour les études de vieillissement (sec.XI) et des fluctuations hors d'équilibre (sec.12a), permet de mesurer avec une grande précision les fluctuations de la biréfringence de cristaux liquides. Nous avons donc monté une cellule de cristaux liquides dans laquelle il est possible d'induire une transition d'orientation grâce à un champ électrique (transition de Fredericks). Cette transition est une transition de phase du deuxième ordre et présente donc la divergence critique du temps et de la longueur de corrélation. Grâce à ces divergences nous avons observé des phénomènes prédits théoriquement mais jamais observés expérimentalement sur une transition de phase. On peut mentionner le changement de la distribution de probabilité des fluctuations d'une gaussienne, loin du point critique, à la Bramwell-Holdsworth-Pinton au point critique [11,15]. Nous avons plus récemment étudié les propriétés des fluctuations de ce système quand il est rapidement trempé près du point critique. Nous avons mis en évidence pour la première fois dans un système expérimentales

certaines effets d'effets très similaires à ceux observés pendant le vieillissement des verres de spin [15,23], qui avaient été prédit théoriquement. La chose intéressante est que malgré la simplicité de ces systèmes il y a plusieurs résultats expérimentaux qui ne sont pas bien expliqués et qu'il faudra développer ultérieurement [23]. Les théorèmes de fluctuations dans un système étendu est un autre aspect intéressant [19]. Nous voulons étudier en détail ces effets les prochaines années en collaboration avec Peter Holdsworth qui a étudié ces problèmes théoriquement dans les années passées.

#### **IV-c) Pièges Optiques**

Toujours dans la perspective d'avoir des systèmes expérimentaux qui permettent d'étudier les fluctuations dans les systèmes hors équilibre nous avons monté avec A. Petrosyan un système de piégeage optique de particules Browniennes. Nous avons fait le choix de tout réaliser au laboratoire plutôt qu'installer le système dans un microscope commercial. Ceci a eu un avantage économique, mais surtout ça nous donne la possibilité de modifier et adapter le montage à nos besoins. En fin il est très instructif pour les étudiants en stage de voir comme on réalise un instrument scientifique. Notre système permet de piéger avec un potentiel harmonique ou anharmonique une seule ou plusieurs particules et de les déplacer. On peut donc étudier les fluctuations dans des conditions les plus variées.

Une des premières expériences nous l'avons réalisée avec P. Gaspard de l'Université Libre de Bruxelles. Nous nous sommes intéressés aux fluctuations d'une particule Brownienne pilotée hors d'équilibre par une force externe. Nous avons montré qu'il est possible de mesurer les taux de production d'entropie dans un système dissipatif hors équilibre par la mesure de l'asymétrie temporelle des fluctuations [5,14]. Ceci est un problème très intéressant que nous voulons étudier dans des situations plus compliquées.

En collaboration avec J. R. Gomez-Solano(doctorant), R. Chetrite A. Petrosyan, K.Gawedzki, nous avons utilisé ce système de piégeage pour vérifier [24] une nouvelle forme du théorème de fluctuation dissipation pour les systèmes hors équilibre proposé récemment par Chetrite et Gawedzki.

En collaboration P. Jop (post-doct ANR), J. R. Gomez-Solano(doctorant) et A. Petrosyan nous avons étudié les fluctuations Browniennes quand la particule se trouve dans un gel pendant la phase de gélification, c'est à dire le bain thermique de la particule est hors équilibre. Nous avons observé que malgré la viscosité du bain thermique évolue au cours du temps le théorème de Fluctuation Dissipation est toujours vérifié par la particule Brownienne [16,22].

En fin nous avons étudié les théorèmes de fluctuations dans le cas de la résonance stochastique. Ceci est un cas très non-linéaire jamais étudié expérimentalement dans le cadre des théorèmes de fluctuations. Les résultats expérimentaux [12] confirment les prédictions théoriques que nous sommes avons développés pour l'équation de Langevin avec A. Imparato[21].

Les années prochaines nous voulons utiliser ce système expérimental, très versatile, pour continuer nos études sur les fluctuations dans les systèmes physiques hors équilibre et dans certains systèmes biologiques (par exemple surface d'une cellule, colonie de bactéries ...).

#### **V PERSPECTIVES**

Dans le futur immédiat je pense continuer à travailler sur la fracture, le vieillissement et les fluctuations dans les systèmes hors équilibre. Sur ces trois sujets restent plusieurs problèmes ouverts. Par exemple dans le cas de la fracture il faudra se concentrer sur la contribution de la viscoplasticité à la dynamique lente d'une fissure. Cet effet peut dominer sur

les effets d'activation thermique et le problème n'est pas actuellement résolu ni théoriquement ni expérimentalement. En ce qui concerne le vieillissement le problème de l'intermittence et sa connexion avec les modèles théoriques est un point très important pour comprendre la dynamique vitreuse. Un autre problème intéressant est la connexion entre les fluctuations dans les systèmes hors équilibre et le vieillissement. On peut se poser la question si les théorèmes de fluctuation à la Gallavotti-Cohen peuvent donner des informations importantes pour la dynamique vitreuse. Certains modèles semblent indiquer que c'est le cas et nous sommes en train d'étudier ce problème expérimentalement. Pour ce faire nous avons monté cette dernière année deux nouvelles expériences complémentaires, une sur le vieillissement au point critique et une autre sur les fluctuations Browniennes dans un gel hors équilibre. Les premiers résultats préliminaires montrent que ces deux expériences seront très utiles pour donner des nouvelles informations sur le problème des fluctuations dans les systèmes hors équilibre. Sur ce sujet j'ai co-organisé en 2007 en 2008 deux conférences. En 2007 j'ai été co-organisateur d'un trimestre thématique à l'IHP. En 2008 j'ai été le responsable à Lyon d'une conférence internationale UPON2008 (Unsolved Problems On Noise). L'autre activité que je pense approfondir dans des autres systèmes plus compliqués que les cristaux liquides décrits Ivc) sont les problèmes liés aux fluctuations critiques dans un système confiné (Casimir Critique) ou après une trempe au point critique. Les mixtures binaires de liquides ou de polymères semblent être des bons candidats pour ces types d'étude.

#### **Liste des publications dans les revues à comité de lecture. (2006-2009)**

- [1] The cooperative effect of load and disorder in thermally activated rupture of a two-dimensional random fuse network, A. Guarino, , L. Vanel, R. Scorretti, S. Ciliberto, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*.2006..P06020
- [2] Subcritical crack growth in fibrous materials Santucci S, Cortet PP, Deschanel S, et al.*Europhysics Letters* 74 (4): 595-601, (2006).
- [3] Super-Arrhenius dynamics for sub-critical crack growth in two-dimensional disordered brittle media , Cortet PP, Vanel L, Ciliberto S, *Europhysics Letters* 74 (4): 602-608, (2006).
- [4] Work Fluctuation Theorems for Harmonic Oscillators F. Douarche, S. Joubaud, N. B. Garnier, A. Petrosyan, and S. Ciliberto *Phys. Rev. Lett.* 97, 140603 (2006).
- [5] Entropy production and time asymmetry in nonequilibrium fluctuations, D. Andrieux P. Gaspard, S. Ciliberto, N. Garnier, S. Joubaud, et A. Petrosyan, *Phys. Rev. Lett.* 98, 150601 (2007)
- [6] Statistical properties of microcracking in polyurethane foams under tensile test, influence of temperature and density S. Deschanel, L. Vanel, G. Vigier, N. Godin and S. Ciliberto, *International journal of fracture*, 140, 87 (2006)
- [7] Slow crack growth: models and experiments, S. Santucci, L. Vanel, S. Ciliberto, *EPJ ST*, 146, 341 (2007).
- [8] Experimental study of work fluctuations in a harmonic oscillator, S. Joubaud, N. B. Garnier, F. Douarche, A. Petrosyan, S. Ciliberto, *C. R. Physique* 8 (2007) 518–527

- [9] Fluctuation theorems for harmonic oscillators, S. Joubaud, N. B. Garnier, S. Ciliberto, J. Stat. Mech. 09 (2007) P09018
- [10] Dynamical law for slow crack growth in polycarbonate films by P. Cortet, L. Vanel, S. Ciliberto, Phys. Rev. Lett. 99, 205502 (2007)
- [11] Experimental evidence of non-Gaussian fluctuations near a critical point. S. Joubaud, A. Petrosyan, S. Ciliberto, N. Garnier, Phys. Rev. Lett. 100, 180601 (2008)
- [12] Work and dissipation fluctuations near the stochastic resonance of a colloidal particle, P.Jop, S. Ciliberto, A. Petrosyan, Eur. Phys. Lett. 81, 5 (2008) 50005
- [13] Fluctuations of the total entropy production in stochastic systems, S.Joubaud, N. Garnier, S. Ciliberto, Eur. Phys. Lett. 82, 3 (2008) 30007
- [14] Thermodynamic time asymmetry in nonequilibrium fluctuations, D. Andrieux, S. Ciliberto, N. Garnier, P. Gaspard, S. Joubaud, A. Petrosyan, J. Stat. Mech. (2008) P01002
- [15] Finite size effects and aging near a critical point, S. Joubaud, A. Petrosyan, S. Ciliberto, Physosphical Magazine, 88, 4189 (2008)
- [16] Brownian Motion in a Colloidal Glass, P. Jop , A. Petrosyan, S. Ciliberto, Phylosphical Magazine 88, 4205 (2008).
- [17] Surface oscillations and slow crack growth controlled by creep dynamics of necking instability, P. Cortet, L. Vanel, S. Ciliberto, European Physical Journal E 27 2 (2008) 185-195
- [18] Experimental study of crackling noise: conditions on power law scaling correlated to fracture precursors, S. Deschanel, L. Vanel, G. Vigier, N. Godin, S. Ciliberto, J. Stat. Mech. (2009) P01018.
- [19] Work fluctuations in a nematic liquid crystal, S. Joubaud, G. Huillard, A. Petrosyan, S. Ciliberto, J. Stat. Mech. (2009) P01033
- [20] Attractive and repulsive cracks in a heterogeneous material, Pierre-Philippe Cortet, Guillaume Huillard, Loïc Vanel and Sergio Ciliberto, J. Stat. Mech. (2008) P10022
- [21] Probability density functions of work and heat near the stochastic resonance of a colloidal particle, Alberto Imparato, Pierre Jop, Artyom Petrosyan and Sergio Ciliberto, J. Stat. Mech. (2008) P10017
- [22] Experimental study of out of equilibrium fluctuations in a colloidal suspension of Laponite using optical traps, P. Jop , R. Gomez Solano, A. Petrosyan, S. Ciliberto, J. Stat. Mech. (2009) P04012
- [23] Aging and effective temperatures Near a critical point, S. Joubaud, B. Percier, A. Petrosyan, S. Ciliberto, Phys. Rev. Lett. 102, 130601 (2009).

- [24] Experimental verification of a modified fluctuation-dissipation relation for a micron-sized particle in a non-equilibrium steady state, J. R. Gomez-Solano, A. Petrosyan, S. Ciliberto, R. Chetrite, and K.Gawedzki, *Phys. Rev. Lett.* 103, 040601 (2009).
- [25] Time-dependent rupture and slow crack growth: elastic and viscoplastic dynamics, Loic Vanel, Sergio Ciliberto, Pierre-Philippe Cortet, Stéphane Santucci, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42 No 21 (7 November 2009) 214007
- [26] Mechanical response and fracture dynamics of polymeric foams, S Deschanel, L Vanel, N Godin, E Maire, G Vigier, S Ciliberto, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42 No 21 (7 November 2009) 214001