

Encadrants: Annalisa Panati et Claude-Alain Pillet
annalisa.panati@univ-tln.fr, pillet@univ-tln.fr

Laboratoire: Centre de Physique Théorique, UMR 7332

Unité d'enseignement: Département de Mathématiques
Université de Toulon
Avenue de l'Université, BP 20132
83957 La Garde Cedex, France

Température locale: du macro au micro

Ce sujet de thèse en physique-mathématique porte sur des aspects conceptuels de la mécanique statistique hors-équilibre et plus particulièrement sur certains problèmes à l'interface entre mécanique quantique et relativité générale.

La mécanique statistique est aujourd'hui largement impliquée dans une grande variété d'activités scientifiques, bien au-delà de son contexte original. Elle fournit en effet des outils inestimables pour l'analyse de nombreux phénomènes en biologie, en épidémiologie, en dynamique de fluides ou des populations, *etc.* La mécanique statistique hors-équilibre est une théorie encore en plein développement qui a connu d'importantes avancées durant les trois dernières décennies. Mentionnons en particulier les travaux pionniers d'Evans, Cohen, Morriss et Searles sur les violations de la deuxième loi de la thermodynamique [ES, ECM], immédiatement suivis par la célèbre formulation du théorème de fluctuation par Gallavotti et Cohen [GC1, GC2], et qui ont initié une abondante littérature, tant théorique qu'expérimentale (voir [RMM] pour un aperçu historique). L'adaptation de ces résultats à des régimes appelant une description quantique pose de nombreux problèmes de nature technique et conceptuelle. Elle nécessite en particulier de prendre en compte les effets des mesures effectuées sur le système.

Notre groupe de recherche est très actif sur ces thématiques et a déjà obtenu des résultats importants (voir les pages du projet ANR [NonStops](#)). Un de ses points forts tient à sa capacité à mettre en œuvre une variété de techniques mathématiques, notamment l'analyse spectrale, les algèbres d'opérateurs et les probabilités, qui nous permettent d'approcher le même problème de plusieurs points de vue.

Un des encadrants est un pionnier, avec V. Jakšić, de l'introduction et du développement des certaines de ces techniques à l'étude des systèmes hors-équilibre, en particulier dans le contexte de systèmes ouverts. L'autre encadrant bénéficie d'une expertise dans la théorie quantique des champs en espace-temps courbe. Le sujet que nous proposons exploite au mieux les expertises combinées des deux encadrants.

Dans le contexte de la théorie quantique de champs sur un espace-temps courbe, il existe plusieurs effets qui mettent en évidence soit l'émission de radiations, soit des variations spatiales de température comme effets de la courbure ou de l'accélération: l'effet Hawking [H, FH, B], l'effet Unruh [U, UW, DBM] et l'effet Tolman-Ehrenfest [TE]. Dans un article récent, De Bièvre et Merkli [DBM] ont utilisé l'approche de Jakšić–Pillet pour décrire l'effet Unruh pour un observateur uniformément accéléré. Nous proposons de pousser plus avant cette direction de recherche. En effet, même si, dans le cas simplifié d'un observateur uniformément accéléré, les aspects calculatoires de l'effet Unruh ont été largement explorés, aucun consensus n'a été atteint concernant son interprétation (voir [BV] pour une discussion). De fait, émerge de diverses discussions des effets déjà cités, la nécessité d'introduire un concept de température locale — opposé à celui de température globale. En d'autres termes, une distinction doit être faite entre un paramètre global, la température qui entre dans la condition de Kubo-Martin-Schwinger (KMS) et qui détermine l'état d'équilibre thermodynamique du champ aux échelles macroscopiques, et une température microscopique telle qu'elle peut être mesurée localement par un observateur. Plusieurs propositions

de définition de cette température locale ont été faites, en particulier par Buchholz *et al.* (local thermal equilibrium, [BOR]) et par Gransee *et al.* (local KMS condition, [GPV]). Ces approches se focalisent sur la caractérisation de l'état par rapport à un ensemble bien choisi d'observables locales. L'originalité de l'approche de De Bièvre–Merkli est de considérer cette question comme un problème de systèmes ouverts, où un petit système — le détecteur qui sert de thermomètre — est couplé à un réservoir — le champ. Dans cette perspective, le problème de définir une température locale en espace courbe se trouve être complètement similaire au même problème mais dans un système étendu en état stationnaire hors équilibre. C'est cette similarité que nous proposons d'exploiter dans ce sujet de thèse. En particulier en suivant d'autres approches envisageables, par exemple en terme du contrôle des flux de chaleur, considéré par un des encadrants dans [JP].

Dans ses grandes lignes, ce projet de thèse se développera de la façon suivante:

- ▶ Sur des modèles paradigmatiques de systèmes ouverts, comparer diverses définitions possibles de la température locale pour des états hors équilibre ou des états d'équilibre inhomogènes. On commencera par les modèles les plus simples, en progressant vers les plus réalistes.
- ▶ Dans le même esprit, on considérera des modèles simplifiés pour l'effet Unruh avec des détecteurs (quantiques) à N -niveaux, ce qui nous permettra déjà capturer des aspects essentiels du problème (seuls des systèmes à deux niveaux sont considérés par [DBM]).
- ▶ Dans les modèles considérés, analyser des couplages détecteur-champ plus réalistes.
- ▶ Tenter d'étendre l'analyse obtenue au cas plus difficile de l'effet Hawking.

Chacun des résultats ci-dessus représente une avancée suffisamment notable pour constituer un article de recherche intéressant.

References

- [B] A. Bachelot: The Hawking effect. *Ann. Inst. H. Poincaré Phys. Théor.* **70**, 41–99 (1999).
- [BOR] D. Buchholz, I. Ojima et H. Roos: Thermodynamic properties of non-equilibrium states in quantum field theory. *Ann. Phys.* **297**, 219–242 (2002).
- [BV] D. Buchholz et R. Verch: Macroscopic aspects of the Unruh effect. *Class. Quantum Grav.* **32**, 245004 (2015).
- [DBM] S. de Bièvre et M. Merkli: The Unruh effect revisited. *Class. Quantum Grav.* **23**, 6525–6542 (2006).
- [ECM] D.J. Evans, E.G.D. Cohen et G.P. Morriss: Probability of second law violation in shearing steady flows. *Phys. Rev. Lett.* **71**, 2401–2404 (1993).
- [ES] D.J. Evans et D.J. Searles: Equilibrium microstates which generate second law violating steady states. *Phys. Rev. E* **50**, 1645–1648 (1994).
- [FH] K. Fredenhagen et R. Haag: On the derivation of Hawking radiation associated with the formation of a black hole. *Commun. Math. Phys.* **127**, 273–284 (1990).
- [GC1] G. Gallavotti et E.G.D. Cohen: Dynamical ensembles in nonequilibrium statistical mechanics. *Phys. Rev. Lett.* **74**, 2694–2697 (1995).
- [GC2] G. Gallavotti et E.G.D. Cohen: Dynamical ensembles in stationary states. *J. Stat. Phys.* **80**, 931–970 (1995).

- [GPV] M. Gransee, N. Pinamonti, et R. Verch: KMS-like properties of local thermal equilibrium states in quantum field theory. *J. Geom. Phys.* **117**, 15–35 (2017).
- [H] S.W. Hawking: Particle creation by black holes. *Commun. Math. Phys.* **43**, 199–220 (1975).
- [JP] Ph.A. Jacquet et C.-A. Pillet: Temperature and voltage probes far from equilibrium. *Phys. Rev. B* **85**, 125120 (2012).
- [RMM] L. Rondoni et C. Mejía-Monasterio: Fluctuations in non-equilibrium statistical mechanics: models, mathematical theory, physical mechanisms. *Nonlinearity* **20**, 1–37 (2007).
- [TE] R.C. Tolman et P. Ehrenfest: Temperature Equilibrium in a Static Gravitational Field. *Phys. Rev.* **36**, 1791–1798 (1930).
- [U] W.G. Unruh: Notes on black hole evaporation. *Phys. Rev. D* **14**, 870–892 (1976).
- [UW] W.G. Unruh et R. Wald: What happens when an accelerating observer detects a Rindler particle. *Phys. Rev. D* **29** 1047–1056 (1984).