

Préface

Les écoles d'été des Houches ont une longue tradition dans le domaine des systèmes désordonnés ou hors équilibre, avec en particulier la célèbre 31^e session de 1978, "La matière mal condensée", suivie des sessions de 1986, "Le hasard et la matière" et 1989, "Liquides, cristallisation et transition vitreuse". Ce volume peut donc être vu comme une continuation logique de cette tradition, incorporant les progrès considérables de la dernière décennie, construits sur les concepts développés dans deux communautés différentes, celle des fluides complexes et celle des systèmes désordonnés.

Cette école s'est concentrée sur le concept unificateur de dynamique hors équilibre. Aussi curieux que cela puisse paraître, la constatation que la compréhension des systèmes hors équilibre ne peut pas se limiter à une description de leur propriétés statiques "d'équilibre" est relativement récente. Cependant, dès que l'on s'éloigne du terrain familier de la physique d'équilibre, il n'y a plus de méthode établie pour décrire les surprenantes entités rencontrées. Les difficultés ne concernent pas seulement les méthodes de calcul, mais viennent plus profondément de l'échec de notre intuition classique, fondée sur la notion d'équilibre thermodynamique. Les cours de cette école ont présenté de nombreux exemples de cette situation : des transitions de phase inattendues dans les systèmes forcés, les curieuses lois de comportement des systèmes granulaires, pâteux ou colloïdaux, les deux températures dans les systèmes vieillissants, l'évolution des systèmes vivants, de l'échelle de la protéine à celle des espèces.

Il est amusant de constater que ces situations n'ont rien de particulièrement exotique, mais constituent la majorité des processus physiques quotidiens. De la biologie à l'industrie, le non équilibre est la règle, plutôt que l'exception. Les outils théoriques développés pour décrire les situations hors équilibre peuvent donc se révéler utiles dans des contextes très variés, ce qui explique le très large spectre des thématiques abordées lors de cette école, du repliement des protéines à la mécanique des systèmes granulaires.

Étant donné l'état de développement du sujet, une école dans ce domaine ne peut être organisée d'une manière aussi linéaire et logique que le serait, par exemple, une revue de la théorie des champs ou de la physique

statistique d'équilibre. Nous nous sommes donc appuyés sur la pédagogie et l'intuition de chaque enseignant pour obtenir une introduction de qualité à chacun des domaines abordés, avec l'espoir que les liens entre ces approches apparaîtraient naturellement aux étudiants. Les sessions de discussion très actives organisées par les étudiants eux-mêmes, et dont certaines ont conduit à des chapitres de ce volume, ont été une contribution importante à l'établissement de ce cadre de réflexion commun.

Les cours de Z. Racz sur des systèmes modèles hors équilibre constituent un point de départ rigoureux pour apprécier les différences macroscopiques de comportement entre situations d'équilibre et hors équilibre.

Un point de vue différent sur les systèmes hors d'équilibre, issu de la communauté des fluides complexes, est apporté par les contributions de A. Ajdari et M. Cates. Ces deux cours abordent différents aspects du comportement de systèmes "mous" en écoulement, ce type de systèmes étant omniprésent aussi bien dans la matière vivante que dans les applications industrielles. Ces cours ont été complétés par une série de séminaires (non publiés) de B. Cabane, qui a mis en évidence quelques applications pratiques de la rhéologie des fluides complexes.

D'un point de vue théorique, ces approches sont étroitement reliées à celles utilisées pour décrire verres et matière granulaire. Dans cette optique, la présentation par J.-P. Bouchaud des propriétés statiques de la matière granulaire a représenté un effort important pour montrer les ramifications multiples de la physique des systèmes désordonnés.

Les verres sont sans aucun doute l'archétype des systèmes désordonnés, et de nombreuses méthodes et concepts théoriques ont été élaborés pour décrire leurs propriétés. Trois contributions de grande ampleur par W. Kob, L. Cugliandolo et G. Parisi ont été consacrées aux aspects théoriques de ce sujet central. Ces contributions présentent différents aspects d'une description théorique unifiée qui a émergé dans les dix dernières années, et qui est aujourd'hui activement testée dans les expériences et les simulations. D. Fisher, dont le cours (non publié) portait sur l'évolution des espèces, a bien voulu apporter une contribution écrite sur le thème des états d'équilibre et la dynamique des systèmes vitreux. Sur le front expérimental, des comptes rendus très complets de la situation actuelle ont été donnés par S. Ciliberto et M. Ocio, qui ont en particulier décrit leurs expériences pionnières sur le vieillissement et la réponse hors équilibre.

Les systèmes quantiques sont une source continue de problèmes aussi intéressants que difficiles, avec des conséquences pour le fonctionnement de dispositifs pratiques. Cette école ne pouvait couvrir complètement ces aspects, mais quelques fenêtres ont été ouvertes grâce aux efforts de Z. Ovadyahu (vieillissement dans les isolants de Mott), N. Savitskaya et

V. Ryazanov (non publié) sur la dynamique des réseaux de jonctions supra-conductrices.

Les défis posés par les problèmes biologiques attirent aujourd’hui de nombreux physiciens. Il est raisonnable de penser que les contributions pertinentes de la physique ne seront pas toujours limitées à des considérations d’équilibre thermodynamique. Les cours de A. Finkelstein (dynamique des protéines), D. Fisher (évolution des populations, non publié) et D. Wales (paysages d’énergie dans des systèmes complexes, non publié¹) sont des exemples d’application aux systèmes biologiques des concepts de la physique hors équilibre.

Un résultat très positif de l’école, déjà mentionné ci-dessus, a été l’émergence de groupes de discussion organisés par les étudiants, qui se sont conclus par une série de séminaires. Ce système “auto-organisé” a rassemblé des participants venant de domaines et/ou continents différents dans des groupes de travail informels. Les contributions de Holmes *et al.*, Bond *et al.* et Berthier *et al.* constituent un compte rendu synthétique de discussions souvent animées.

Nous souhaitons remercier l’ensemble des auteurs pour l’effort qu’ils ont fait en préparant ces notes de cours, qui couvrent souvent un domaine plus large que celui qu’ils ont pu aborder durant la session. Nous espérons que ce volume, suivant la tradition de nombreux autres comptes rendus des écoles des Houches, constituera un ouvrage de référence pendant de nombreuses années pour les étudiants et chercheurs travaillant dans ce domaine en évolution rapide.

Remerciements

La 77^e école des Houches et ce volume ont bénéficié largement du soutien financier des institutions suivantes, que nous remercions chaleureusement:

- le programme “Conférences Scientifiques de Haut Niveau” de la Direction à la Recherche de la Commission Européenne (contrat HPCF-CT-2001-00075) ;
- le programme “Advanced Scientific Institute” de la Division des Affaires Scientifiques et Environnementales de l’OTAN (contrat ASI-978104) ;

¹On trouvera une contribution de D. Wales sur des sujets similaires dans les comptes rendus de la 73^e école des Houches, édités par C. Guet, P. Hobza, F. Spiegelmann et F. David, EDP Sciences-Springer, 2001.

- le programme de Formation Permanente du Centre National de la Recherche Scientifique (France) ;
- L'Université Joseph Fourier, le Centre National de la Recherche Scientifique, le Ministère de la Recherche et le Commissariat à l'Énergie Atomique, par leur soutien récurrent à l'École de Physique des Houches.

Le personnel permanent de l'École, en particulier Brigitte Rousset, Isabelle Lelièvre et Ghyslaine d'Henry, ont apporté une assistance indispensable lors de toutes les étapes de mise en place et de réalisation de l'école. Nous les remercions chaleureusement, au nom de l'ensemble des participants, enseignants et étudiants. Nos remerciements vont également au précédent directeur François David pour son aide dans la mise en place initiale, et au conseil scientifique de l'école pour nous avoir encouragé à proposer une session sur ce thème.

Jean-Louis Barrat
Mikhail Feigelman
Jorge Kurchan
Jean Dalibard

Preface

The les Houches summer schools have a long standing tradition in the field of disordered and nonequilibrium systems, starting with the well known 31st session “Ill Condensed Matter” in 1978, they continued with sessions such as “Chance and Matter” in 1986 and “Liquids, freezing and the glass transition” in 1989. The present volume can therefore be seen as a logical continuation of this tradition, which incorporates the considerable progress in the field that took place during the last decade, building on concepts developed in two different communities, that of complex liquids and that of disordered systems.

The focus of the summer school reported here was on nonequilibrium dynamics as a unifying concept. In fact, an important realization of the 90’s was certainly that – as obvious as this statement may seem – the understanding of nonequilibrium systems cannot be limited to a study of their static, “equilibrium” properties. However, once we abandon the familiar territory of equilibrium and its surroundings, there are no established ways to deal with all the surprising creatures we encounter. We face difficulties not only in the calculations, but much more importantly our old, equilibrium intuition fails us. These lectures are full of examples of this: unexpected phase transitions in driven systems, the bizarre behaviour of granular, pasty and colloidal matter, a two-temperature behaviour in aging systems, and the evolution of living systems at the protein and the species level.

What is perhaps most astonishing is that these situations do not belong to a far-fetched world, but constitute the basis of our everyday-life physics, from biological to industrial processes, as well as in the very nature of the matter that surround us. Nonequilibrium is the rule, rather than the exception. Hence the theoretical tools developed to describe nonequilibrium situations can be useful in widely different contexts. This explains the rather broad range of topics covered in these lectures, from protein folding to disordered conductors and granular mechanics.

Given its present state of development, a school or a collection of papers on this subject cannot be as articulate and linear as, say, a presentation of field theory or equilibrium statistical mechanics. We have thus relied on

the good taste and intuition of each lecturer, to introduce the concepts of their field in the most pedagogical way, with the hope that the connections between the different approaches should be naturally apparent to the students. The lively discussion sessions organized by the students themselves, some of which have led to contributions to this volume, were an important contribution to the establishment of such a common framework.

Z. Racz' lectures about model out of equilibrium systems provide a rigorous starting point to appreciate the differences between equilibrium and non-equilibrium macroscopic behaviour.

A rather different point of view on nonequilibrium systems, coming from the complex fluid community, is provided by the lectures of A. Ajdari and M. Cates. Both deal with different aspects of soft, flowing matter, a kind of system ubiquitous in living as well as industrial systems. These lectures were complemented by a series of (unpublished) seminars by B. Cabane, who demonstrated some practical implications of complex fluids rheology.

From the theoretical point of view, these approaches have strong connections both with granular matter and with glasses. In this sense, the presentation by J.-P. Bouchaud of static properties of granular matter was done with a special emphasis for showing the multiple ramifications in the physics of disordered systems.

Glasses are no doubt the historical paradigm of disordered, nonequilibrium systems, and many theoretical methods and concepts have been designed for dealing with their properties. On the theory side, three extensive contributions by W. Kob, L. Cugliandolo and G. Parisi have been devoted to this central topic of the school. These lectures present different aspects of a unified theoretical picture that has emerged in recent years and is now being actively tested. D. Fisher, whose oral lectures (unpublished) dealt with species evolution, also contributed in writing a detailed viewpoint on the nature of equilibrium states in glassy systems and glassy dynamics. On the experimental side, up to date reviews of the experimental situation are presented in the contributions by S. Ciliberto and M. Ocio, who in particular gave a beautiful account of their pioneering experiments on aging.

Quantum systems often pose interesting, though daunting, out of equilibrium problems, especially in relation with devices. The summer school could not do full justice to this field, with the exception of Z. Ovadyahu's lectures on aging of electronic systems, and N. Savitskaya and V. Ryazanov (unpublished) on the dynamics of superconductor systems.

Many physicists are attracted these days by the challenges of biology. There is little doubt that if physics' contribution to living matter is to be relevant, it has to free itself from the tight limitations of thermal equilibrium.

The lectures of A. Finkelstein (protein dynamics), D. Fisher (theory of biological evolution, unpublished) and D. Wales (chemical reactions and landscapes; unpublished¹) are some examples.

One of the most rewarding experiences of this school, already mentioned above, has been the discussion groups organized by students, which culminated in collective seminars. The system was fully self-organized, and assembled students working in different contexts (and/or continents). The contributions of Holmes *et al.*, Bond *et al.* and Berthier *et al.* are sober renderings of what were often animated discussions.

We thank all contributors for the effort they made in preparing these lecture notes, which often cover much more material than the lectures themselves. We strongly hope that this set of lectures will, in the tradition of many earlier volumes of the Les Houches series, provide a useful introduction and serve as a reference for several years for researchers and students in this very open and rapidly evolving field.

Acknowledgments

The 57th Les Houches summer school and the present volume have been made possible by the financial support of the following institutions, whose contribution is gratefully acknowledged:

- the “High Level Scientific Conference” program of the Research Directorate of the European Commission under grant HPCF-CT-2001-00075;
- the “Advanced Scientific Institute” program of the Scientific and Environmental Affairs division of NATO, under grant ASI-978104;
- the “Lifelong learning” program of the Centre National de la Recherche Scientifique (France);
- the Université Joseph Fourier, the French Ministry of Research and the Commissariat à l’Énergie Atomique, through their constant support to the Physics School.

The permanent staff of the School, especially Brigitte Rousset, Isabelle Lelièvre and Ghyslaine d’Henry, have been of invaluable assistance at every

¹A related contribution by D. Wales can be found in the proceedings of the 73rd Les Houches summer school, edited by C. Guet, P. Hobza, F. Spiegelmann and F. David, EDP Sciences-Springer, 2001.

stage of the preparation and development of the school, and we would like to thank them warmly on behalf of all students and lecturers. We also thank the former director François David for his help during the early stages of preparation, and the school scientific council for encouraging us in preparing a session on this topic.

Jean-Louis Barrat
Mikhail Feigelman
Jorge Kurchan
Jean Dalibard