



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

## Comptes Rendus Physique

www.sciencedirect.com



## Disordered systems/Systèmes désordonnés

## Foreword

At first sight, it seems that disorder is mostly an annoyance, something that one should get rid of in experiments to be able to compare them to the beautiful theories of the perfect theoretical world.

However, besides the fact that every real system offers usually some level of disorder, it was rapidly realized both for the classical and perhaps even more for the quantum systems that the presence of disorder leads to remarkable new effects that deserve a study in their own right. Perhaps the most well-known effect is the famous Anderson localization: a quantum particle in a random potential being totally localized, e.g. in one dimension, by any infinitesimal amount of disorder.

When disorder goes hand in hand with interactions, the effects are even more spectacular and still largely not understood. Interactions tend to favor some configurations for the system, typically imposing some kind of order in it. When disorder is also present, it competes with such an order and usually leads to a large number of nearly degenerate energy states, which can be separated by huge energy barriers. This leads to the physics of glassy systems and to remarkable static and dynamical properties.

These properties show up both in classical and quantum systems. On the classical front it has drastic consequences for the static and dynamical properties of elastic structures, such as domain walls or vortices, when they are subjected to pinning by disorder. Such a competition between elasticity and pinning is important not only from a fundamental point of view but also from a very practical one, since moving domain walls in magnetic and ferroic systems conditions our ability to use such devices to store information or our ability to read it. On a more general level, the possibility to have a classical or a quantum system with many different near-equilibrium states means that its time evolution is very peculiar. It can in particular lead to aging, meaning that measurements done on such a system will not be invariant by translation in time. The system will remember at which moment it was frozen in its glassy state. Understanding or observing such non-equilibrium properties is thus a considerable challenge. Finally, for quantum problems, the interplay between disorder and interactions is crucial. Interactions are known to lead to remarkable phases such as superconducting or superfluid phases, phases we thought impervious to the disorder. On the other hand, we know since Anderson localization that interference effects can destroy the very possibility of normal transport. How this competition takes place and what are the resulting phases or in which system to observe them is of course an extremely challenging question.

The present dossier discusses this type of physics. Of course the scope is humongous and a whole encyclopedia would be needed. Some selection should thus be made. To do so, we decided to include topics that have known recently some important developments both on the experimental or the theoretical side, and which were not duplicating material already extensively reviewed in the literature. The eight chapters of this dossier, as detailed below, cover thus several facets of disordered systems ranging from classical to quantum ones. Trying to present only the latest results would be of interest only to the specialists and useless for most readers. Thus each chapter contains a review of the state of the art of an important system or method, in a way which is hopefully interesting and accessible even for the non-specialist. In addition to this review part, each article also pushes the discussion towards today's frontiers of the field. As a consequence the chapters also present some issues for which hot debate still goes on in the community, and different chapters might reach different conclusions on such points. This is the way research is done and we hope that this will convey to the reader the sense of excitement which is definitely going very strongly in this beautiful domain of disordered systems.

**Reader's guide to the dossier**

This dossier covers three main directions of the physics of disordered interacting systems. Given the links between classical and quantum systems, both classes of problems were included. To guide the reader through the dossier here is a brief summary of the issues touched by each of the articles.

*Classical systems*

The section on classical systems deals mostly with the physics of domain walls, both on the theoretical and experimental front.

On the theoretical front, numerical study of such systems have proven to be extremely useful. The chapter by E.E. Ferrero, S. Bustingorry, A.B. Kolton and A. Rosso gives a summary of the main concepts behind this disordered elastic systems physics both from the static and the dynamical point of view. It also provides a review on the various facets of numerical simulations of such systems. This chapter is directly connected with the two experimental chapters of this section.

The chapter by J. Ferré, P.J. Metaxas, A. Mougin, J.-P. Jamet, J. Gorchon and V. Jeudy reviews the physics of domain walls in magnetic systems. These systems allow very controlled realization of domain walls and were instrumentals in understanding some dynamical phenomena such as the depinning and the creep, which occur when domain walls are subjected to an external force.

The chapter by P. Paruch and J. Guyonnet reviews the physics of domain walls and dynamics in ferroelectric materials. As for magnetic ones, the ferroelectric materials have been model systems in which to study the domain wall physics. Use of nanoscale probes has allowed a remarkable control of their properties in various situations. Understanding the physics of domain walls in these materials is of course a key for their use as information-storing devices.

### *Out of equilibrium and aging physics*

This section deals with the out of equilibrium aspects of disordered systems.

The chapter by L. Cugliandolo presents a very complete review of the various aspects of out of equilibrium physics both in classical and quantum systems. Although our tools to deal with equilibrium situations are by now well established and used, we are still fumbling to find a good set of concepts and techniques to describe out-of-equilibrium situations. This chapter presents the state of the art in this field and connects it with many experimental realizations.

On the experimental front, the chapter by Z. Ovadyahu covers the remarkable situation of electron glasses. In such systems, the Coulomb interaction between the electrons lead to a glassy system. The quantum effects intervene in a crucial way when transport properties are concerned since the particles can move from one localized state to another by tunnelling rather than by Arrhenius activation as for the classical systems. As a results these systems exhibit remarkable out-of-equilibrium properties, which are still largely to be understood.

### *Quantum systems*

For quantum problems, the choice was to concentrate on one of the system for which the competition between disorder and interactions is at its strongest, namely the case of disordered bosons (sometimes called the dirty bosons problem). Such systems have been much studied recently in particular due to the appearance of several new experimental realizations.

As for classical systems, one field which has enormously developed in the recent years is the one of numerical simulations of quantum particles, and in particular bosons. The article by L. Pollet summarizes the state of the art in this respect, discusses the obtained results and mentions some of the open theoretical questions. These questions are of course directly connected with the ones discussed in the two other articles of this section.

On the analytic front, the question of strong disorder has recently been studied in details, and in particular real space renormalization group techniques were developed to tackle this problem. The review by G. Refael and E. Altman reviews this technique and discusses several of the experimental consequences for the phase diagram of one-dimensional disordered bosons. Besides their own theoretical importance, such results are directly relevant for several experimental systems such as cold atomic gases or the magnetic system discussed in the next chapter.

On the experimental front, one class of systems that quite remarkably has been shown to be excellently suited to tackle the issues of interacting bosons is magnetic insulators. Indeed such systems can be mapped onto hard core bosons, whose density can be easily controlled by the application of a magnetic field. The review by A. Zheludev and T. Roscilde presents the state of the art in such systems on the experimental side and also discusses some of the theoretical questions that are prompted by these experiments.

## Avant-propos

Il pourrait sembler au premier abord que le désordre ne soit qu'une gêne, quelque chose que l'on doit minimiser dans les expériences de façon à pouvoir les comparer aux élégantes théories d'un monde parfait, mais théorique.

Néanmoins, en plus du fait que tout système réel contient nécessairement un peu de désordre, il a été rapidement clair pour les systèmes classiques, mais peut-être plus encore pour les systèmes quantiques, que la présence de désordre conduisait à de nouveaux effets remarquables qui méritaient pleinement d'être étudiés en soi. L'effet le plus connu est certainement la célèbre localisation d'Anderson : une particule quantique dans un potentiel aléatoire est toujours localisée, par exemple à une dimension, même si le désordre est infinitésimal.

De plus, quand désordre et interactions sont tous deux présents, les effets sont encore plus spectaculaires et restent encore très largement à expliquer. Les interactions tendent en effet à favoriser certaines configurations du système, typiquement en imposant une forme d'ordre. Quand le désordre est présent, il entre en compétition avec cet ordre et conduit en général à un grand nombre d'états énergétiquement presque dégénérés, mais qui peuvent être séparés les uns des autres par des barrières gigantesques. Ceci conduit à une physique de système vitreux et à des propriétés, tant statiques que dynamiques, remarquables.

Ces propriétés se manifestent à la fois dans les systèmes classiques et quantiques. Du côté classique, il existe des conséquences dramatiques pour les propriétés statiques et dynamiques de structures élastiques, telles que les parois de domaine ou les vortex, quand elles sont soumises à des forces de piégeage dues au désordre. Une telle compétition entre élasticité et piégeage est cruciale, non seulement du point de vue de la physique fondamentale, mais également d'un point de vue très pratique, car notre capacité à déplacer des parois de domaine dans des systèmes magnétiques ou ferroïques détermine directement la possibilité d'utiliser de tels systèmes pour stocker de l'information et la relire. D'un point de vue plus général, la possibilité pour un système classique ou quantique de posséder de nombreux états métastables a pour conséquence directe une évolution temporelle extrêmement spéciale. Ceci peut en particulier conduire au phénomène dit de vieillissement, c'est-à-dire que des mesures effectuées sur un tel système ne sont pas invariantes par translation dans le temps. Le système se souvient du moment où il a été gelé dans son état vitreux. Comprendre et observer de tels phénomènes hors équilibre est évidemment un défi considérable. Pour les problèmes quantiques, la compétition entre désordre et interactions est également cruciale. En effet, les interactions sont la source de propriétés exceptionnelles telles que la supraconductivité ou la suprafluidité, toutes deux des phases qui, d'un point de vue naïf, ne devraient pas être sensibles à la présence d'impuretés. D'un autre côté, nous savons également, depuis la découverte de la localisation d'Anderson, que des effets quantiques d'interférences détruisent la possibilité même d'avoir un état conducteur. Connaître de quelle façon, une compétition entre des états aussi opposés peut se produire, et quelles sont les phases qui en résultent, ou quels sont les systèmes dans lesquels l'observation de tels effets est possible, est évidemment un défi majeur.

Le but du présent dossier est de discuter de la physique mentionnée ci-dessus. Bien sûr, le domaine est immense et une encyclopédie entière n'y suffirait pas. Il fallait donc faire des choix sur les sujets traités. Nous avons donc décidé d'inclure les domaines qui avaient connus des avancées, soit théoriques, soit expérimentales, et de ne pas redoubler des sujets qui sont déjà couverts de façon extensive dans les articles de revue existants. Les huit chapitres de ce dossier, comme il sera indiqué ci-dessous, couvrent donc plusieurs aspects des systèmes désordonnés, allant du classique au quantique. Ne présenter que les derniers résultats n'aurait d'intérêt que pour des spécialistes du domaine et serait opaque pour la plupart des lecteurs. En conséquence, chaque chapitre contient également une revue et une présentation de l'état de l'art sur une méthode ou un système particulièrement important, présenté d'une façon qui, nous l'espérons, sera accessible et intéressante également pour le non-spécialiste. Partant de la revue, chaque article va ensuite jusqu'aux frontières actuelles de leurs domaines respectifs.

Une des conséquences est que les articles présentent également des questions pour lesquelles un vif débat existe dans la communauté et sur lesquelles les différents auteurs peuvent avoir des opinions ou théories radicalement opposées. C'est inévitable en recherche dans les sujets actifs, et nous espérons que ce dossier saura communiquer au lecteur ce sentiment de découverte et d'exploration qui se manifeste toujours de façon extrêmement forte dans ce domaine magnifique des systèmes désordonnés.

## Guide du dossier

Ce dossier présente trois directions principales de la physique des systèmes désordonnés en interaction. Étant donné les liens très forts existant entre les problèmes classiques et quantiques, ces deux aspects ont été inclus. Afin de guider le lecteur, un court résumé de chacun des articles est donné ci-dessous.

### *Systèmes classiques*

Cette section sur les systèmes classique traite principalement de la physique des parois de domaine, tant du point de vue théorique qu'expérimental.

Du point de vue théorique, les méthodes numériques ont largement montré leur utilité. Le chapitre par E.E. Ferrero, S. Bustingorry, A.B. Kolton and A. Rosso présente les concepts majeurs qui sous-tendent la physique des systèmes élastiques désordonnés pour leurs propriétés statiques et dynamiques. Il établit également une revue des divers aspects des simulations numériques de tels systèmes. Ce chapitre est directement lié aux deux chapitres expérimentaux de cette section.

Le chapitre par J. Ferré, P.J. Metaxas, A. Mouglin, J.-P. Jamet, J. Gorchon et V. Jeudy présente une revue de la physique des parois de domaine dans les systèmes magnétiques. Ces systèmes permettent de réaliser, de façon extrêmement contrôlée, des parois de domaines, et se sont avérés idéaux pour comprendre les phénomènes dynamiques tels que le dépiégeage ou la reptation lente, qui se produisent quand la paroi est soumise à une force extérieure.

Le chapitre par P. Paruch et J. Guyonnet présente une revue sur les parois de domaines et leur physique et dynamique dans les matériaux ferroïques. De même que pour les matériaux magnétiques, les matériaux ferroélectriques se sont révélés être des systèmes modèles pour étudier la physique des parois de domaine. L'utilisation de sondes à l'échelle nanoscopique a permis une étude et un contrôle remarquable de leurs propriétés. Comprendre la physique des parois de domaine dans ces matériaux est une des clefs pour leur utilisation en tant que mémoires.

### *Physique hors équilibre et vieillissement*

Cette section présente diverses facettes de la physique hors équilibre des systèmes désordonnés.

Le chapitre par L. Cugliandolo est une revue très complète des divers aspects de la physique hors équilibre dans les systèmes classiques et quantiques. Bien que nos outils théoriques soient maintenant parfaitement au point pour traiter des situations à l'équilibre, nous sommes toujours à la recherche de bons outils et concepts dans le cas hors équilibre. Ce chapitre présente l'état de l'art dans ce domaine et discute des conséquences pour un certain nombre de systèmes expérimentaux.

Du côté expérimental, le chapitre par Z. Ovadyahu présente la physique remarquable des verres d'électrons. Dans de tels systèmes, l'interaction de Coulomb entre les électrons conduit à un état vitreux de ceux-ci. Les effets quantiques se manifestent d'une façon cruciale dans les propriétés de transport, car les particules peuvent passer par effet tunnel d'un état localisé à l'autre, au lieu de devoir surmonter les barrières via l'activation d'Arrhenius, comme dans le cas d'un système classique. De ce fait, ces systèmes possèdent des propriétés hors équilibre singulières, qui restent largement à expliquer.

### *Systèmes quantiques*

Pour les systèmes quantiques, nous avons choisi de nous focaliser sur l'un des systèmes pour lesquels la compétition entre désordre et interactions est à son maximum. Il s'agit du cas des bosons désordonnés (parfois appelés « bosons sales »). De tels systèmes ont été étudiés de façon intensive récemment grâce à la découverte de nouvelles réalisations expérimentales.

De même que pour les systèmes classiques, un des domaines qui a énormément progressé ces dernières années est celui des simulations numériques pour les particules quantiques et en particulier pour les bosons. L'article de L. Pollet résume l'état de l'art dans ce domaine, discute les résultats obtenus grâce à ces méthodes et présente les questions théoriques ouvertes. Ces questions sont bien sûr directement reliées à ce qui est discuté dans les deux autres articles de cette section.

D'un point de vue analytique, la question des propriétés de systèmes à fort désordre a été récemment fort débattue et étudiée en détail. En particulier, des techniques de groupe de renormalisation dans l'espace direct ont été développées dans ce but. Le chapitre de G. Refael et E. Altman présente cette technique et son utilisation pour les bosons désordonnés. Il discute des conséquences pour le diagramme des phases des bosons unidimensionnels en présence de désordre. En plus de leur intérêt théorique intrinsèque, de tels résultats sont directement pertinents pour l'analyse de plusieurs systèmes expérimentaux tels que les atomes froids ou les systèmes magnétiques discutés dans le chapitre suivant.

Du point de vue expérimental, une nouvelle classe de matériaux à base d'isolants magnétiques a récemment montré qu'elle était parfaitement adaptée à l'étude des bosons désordonnés en interaction. En effet, de tels systèmes peuvent être mis en correspondance univoque avec des bosons de cœur dur, dont la densité peut être facilement contrôlée par l'application d'un champ magnétique. Le chapitre d'A. Zheludev et T. Roscilde présente le domaine et ses derniers développements, tant du point de vue expérimental que du point de vue théorique.

Thierry Giamarchi  
E-mail address: [Thierry.Giamarchi@unige.ch](mailto:Thierry.Giamarchi@unige.ch)