



## Création d'une chaire de *Physique statistique* Bernard Derrida est nommé titulaire de cette nouvelle chaire

Leçon inaugurale, le 10 décembre 2015 à 18h00

Bernard Derrida est un physicien théoricien, spécialiste de Physique statistique, la branche de la physique qui vise à comprendre et à modéliser les propriétés des objets du monde qui nous entoure à partir des interactions entre leurs constituants élémentaires (atomes, molécules, ...).

L'école française de Physique statistique est l'une des meilleures au monde et Bernard Derrida l'un de ses représentants les plus renommés. Il a développé tout au long de sa carrière un large éventail de méthodes théoriques<sup>1</sup> utiles bien au delà du champ de la Physique, travaillant par exemple sur des applications à des problèmes de réseaux de neurones, d'évolution en présence de sélection ou de dénaturation de l'ADN. Après Philippe Nozières et Pierre-Gilles de Gennes, il poursuivra au Collège de France ses recherches dans ce domaine particulièrement actif et fondamental pour les sciences.

*Le champ des problèmes auxquels la physique statistique a permis d'apporter des réponses  
n'a cessé de croître au cours des dernières décennies*

Née il y a 150 ans avec Ludwig Boltzmann<sup>2</sup>, la Physique statistique a connu ces cinquante dernières années des avancées conceptuelles remarquables offrant de nouveaux et précieux outils théoriques, non seulement aux physiciens, mais aussi aux biologistes, aux chimistes et plus récemment en informatique ou en sciences sociales.

*« Une des forces de la physique statistique est d'inventer et d'analyser des modèles aussi simples que possible pour décrire la réalité. Le principe général est de partir des interactions entre les constituants élémentaires que peuvent être les atomes ou les molécules et d'en déduire les propriétés des objets perceptibles à notre échelle. Mais la compréhension de ce pont entre le monde microscopique et le monde macroscopique ne se limite pas à la matière inerte et peut être utile dans bien d'autres domaines. Dès que l'on s'intéresse à un grand nombre d'agents en interaction, qu'il s'agisse de réactions entre espèces chimiques, de diversité génétique dans une population, de courants d'opinions dans les réseaux sociaux, de trafic routier ou de dynamique collective d'ensembles de neurones, les méthodes de la physique statistique peuvent être mises en œuvre », précise Bernard Derrida.*

Jusqu'au début des années 90, Bernard Derrida a essentiellement travaillé sur la théorie des systèmes désordonnés, c'est-à-dire sur les effets dus à des « impuretés » microscopiques situées à des positions aléatoires dans les matériaux (les verres de spins par exemple). Il s'est ensuite intéressé à deux autres domaines de la physique statistique : la croissance et les systèmes hors d'équilibre.

La Chaire de Physique Statistique de Bernard Derrida vient enrichir l'Institut de Physique du Collège de France au côté des chaires *Atomes et rayonnement* du Pr Jean Dalibard, *Physique de la matière condensée* du Pr Antoine Georges et de l'ensemble des équipes accueillies. Bernard Derrida donnera sa leçon inaugurale le 10 décembre 2015. Ses cours auront lieu les lundis à 9h30, à partir du 11 janvier 2016. Son cycle d'enseignement sera disponible sur notre site : [www.college-de-France.fr](http://www.college-de-France.fr)

---

<sup>1</sup> Parmi ses contributions les plus connues, Bernard Derrida a formulé et résolu, au début des années 80, le modèle des énergies aléatoires (Random energy model) qui s'est depuis imposé comme un paradigme de la physique des systèmes désordonnés. Il est également l'auteur de solutions exactes de plusieurs modèles de la physique hors d'équilibre comme les processus d'exclusion, qui comptent parmi les modèles les plus simples de transport avec des applications en biophysique, comme les moteurs moléculaires.

<sup>2</sup> Boltzmann réussit à comprendre les lois de la thermodynamique comme résultant du comportement collectif d'un système constitué d'un nombre gigantesque de particules. Il montre avec Maxwell le caractère probabiliste du Second Principe de la thermodynamique. Les observables macroscopiques apparaissent alors comme des valeurs moyennes qu'il est possible de prévoir grâce à la loi des grands nombres.



## La Physique Statistique

La Physique Statistique a pour but de comprendre les propriétés des objets du monde macroscopique, comme tous les objets courants du monde qui nous entoure, à partir des interactions entre les constituants microscopiques que sont par exemple les atomes ou les molécules qui les composent. Ce domaine de la physique s'est énormément développé au cours des 50 dernières années aussi bien sur le plan fondamental que sur celui des applications.

A ses débuts, à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et au début du 20<sup>ème</sup> siècle, il s'agissait d'étudier des gaz dilués, des fluides, des systèmes aimantés, des alliages. Aujourd'hui les outils de la Physique Statistique sont utilisés dans des contextes aussi divers que les polymères en solution, les atomes froids, la matière condensée, les verres, les plasmas, la matière molle, la turbulence, l'astrophysique.

Les méthodes développées pour comprendre les transitions de phase ou rendre compte des fluctuations, comme le champ moyen, la renormalisation, l'ansatz de Bethe, les simulations Monte Carlo se retrouvent dans pratiquement toutes les branches de la physique moderne y compris en physique des particules élémentaires.

Les questions étudiées en Physique Statistique débordent depuis longtemps le domaine de la Physique. Elles sont une source d'inspiration pour plusieurs branches des Mathématiques, en particulier en théorie des probabilités. Par exemple, le mouvement brownien, dont Einstein fit la théorie dans son célèbre article de 1905, est une des pierres angulaires de la théorie des probabilités. Aujourd'hui on peut dire qu'il n'existe plus réellement de frontière entre physique statistique et probabilités.

Ces dernières années les outils de la physique statistique ont permis d'aborder bon nombre de questions en dehors des sciences dures. Dès qu'on s'intéresse à un grand nombre d'agents en interaction, qu'il s'agisse de réactions entre espèces chimiques, de mouvements coordonnés de bactéries dans ce qu'on appelle la matière active, de diversité génétique dans une population, de repliement de molécules biologiques comme les protéines, de courants d'opinions en politique ou dans des réseaux sociaux, du cours des actions en bourse, de dynamique collective d'ensembles de neurones ou de cellules musculaires, de trafic piétonnier ou routier, les méthodes de la physique statistique peuvent être mises en œuvre.

Une des forces principales de ce domaine est d'inventer et d'analyser des modèles aussi simples que possible pour décrire la réalité. Cette capacité à modéliser suscite des collaborations et des échanges de plus en plus nombreux avec des chercheurs d'autres disciplines comme les mathématiques, la chimie, les sciences du vivant ou les sciences sociales.

Ma première année de cours au Collège de France permettra de faire le point sur toute une série de progrès récents de la physique hors d'équilibre. Ces développements donnent un nouvel éclairage du Second Principe de la thermodynamique qui depuis le milieu du 19<sup>ème</sup> est cœur de notre compréhension des phénomènes irréversibles. Ils permettent, en prenant en compte les fluctuations et en utilisant l'outil mathématique des grandes déviations, d'étendre les lois de la thermodynamique à de petits systèmes comme les biomolécules ou les conducteurs mésoscopiques.

Mes cours dans les prochaines années seront centrés autour des deux thèmes principaux auxquels j'ai consacré l'essentiel de mon activité de recherche : la théorie des systèmes désordonnés et celle des systèmes hors d'équilibre. Mon ambition sera d'exposer de la manière la plus simple possible les principales avancées récentes dans ces deux domaines, en essayant de décrire les méthodes analytiques ou numériques actuellement utilisées pour les aborder et en les illustrant par des exemples ou des applications tirés de la physique ou d'autres domaines de la science.

**Bernard Derrida**

## Biographie

Bernard Derrida, né le 12 Décembre 1952 à El Biar en Algérie, est reçu au concours d'entrée à l'Ecole Normale Supérieure en 1971 puis à l'Agrégation de Physique en 1974. Il prépare ensuite sa thèse au Service de Physique Théorique du CEA à Saclay sous la direction de Michel Gaudin puis à l'Institut Laue Langevin de Grenoble dans le groupe de Philippe Nozières. Il passe son doctorat en 1979.

De 1979 à 1993, il occupe un poste de chercheur au Service de Physique Théorique du Centre Nucléaire de Saclay puis devient Professeur des Universités à l'Université Pierre et Marie Curie et à l'Ecole Normale Supérieure. Depuis 1993, il fait également partie du Laboratoire de Physique Statistique de l'Ecole Normale Supérieure.

Bernard Derrida a été nommé professeur au Collège de France titulaire de la Chaire de Physique Statistique en 2015. Il est membre de l'Académie des Sciences depuis 2004 et a été membre de l'Institut Universitaire de France de 2007 à 2015.

Ses principaux thèmes de recherche sont : la transition vers le chaos, la théorie des transitions de phase, les systèmes désordonnés, les réseaux de neurones, la croissance, la physique statistique hors d'équilibre et la modélisation en biologie.

## Travaux de recherche

Depuis la fin des années 70, Bernard Derrida a presque entièrement consacré son activité scientifique à la physique statistique.

La mécanique statistique s'est développée à partir de la fin du 19ème siècle sur les fondements établis par Boltzmann, Maxwell et Gibbs. Elle a permis une compréhension très fine des phénomènes d'équilibre avec sans doute, comme point culminant, la théorie des transitions de phase développée surtout depuis le début des années 60.

Vers la fin des années 70 l'intérêt s'est déplacé vers deux extensions : d'une part la physique des systèmes désordonnés que des approches nouvelles comme la méthode des répliques permettaient d'aborder, d'autre part les systèmes hors d'équilibre pour lesquels il s'agissait de construire la théorie qui généraliserait la mécanique statistique de Boltzmann, Maxwell et Gibbs. C'est autour de ces deux thèmes que s'est concentré principalement son travail de chercheur.

Jusque vers la fin des années 90, Il a essentiellement travaillé sur la théorie des systèmes désordonnés, c'est-à-dire sur les effets dus à des impuretés microscopiques situées à des positions aléatoires dans les matériaux. Ses travaux ont aussi bien porté sur les verres de spins (des alliages dont les impuretés magnétiques, dispersées au hasard dans l'alliage, ont des moments magnétiques qui se figent à basse température), la localisation (qui consiste à étudier le transport d'électrons dans un métal ou plus généralement la transmission d'une onde en présence d'impuretés), les matériaux inhomogènes formés de mélanges d'isolants et de conducteurs, les lignes (comme les lignes de vortex dans les supraconducteurs ou les interfaces) piégées par des impuretés.

La mécanique statistique des systèmes désordonnés l'a amené à utiliser ou à développer tout un éventail de méthodes théoriques, allant d'algorithmes numériques pour déterminer les comportements critiques de conducteurs aléatoires à des développements perturbatifs permettant de calculer des exposants de Lyapounov (qui donnent la conductance de métaux unidimensionnels désordonnés). Ces méthodes se sont révélées utiles pour aborder d'autres problèmes a priori hors du champ de la physique, comme les questions de mémoire et d'apprentissage pour les réseaux de neurones, les problèmes d'évolution en présence de sélection, de spéciation, de repliement d'hétéropolymères comme les protéines, de dénaturation de l'ADN, pour ne citer que quelques exemples liés à la biologie.

Au début des années 90, il a commencé à s'intéresser aux systèmes hors d'équilibre, principalement en essayant de trouver des modèles exactement solubles de transport comme les modèles d'exclusion, de croissance ou de persistance.

Le principal fil conducteur de l'activité scientifique de Bernard Derrida a été de développer ou d'étudier des modèles extrêmement simples à définir, qui essaient de rendre compte d'un phénomène tout en permettant une analyse mathématique précise. Le modèle d'énergies aléatoires et ses généralisations introduit au début des années 80, les modèles d'exclusion sur lesquels il travaille depuis le début des années 90, la dynamique des fronts bruités qui l'occupe également depuis la fin des années 90 en sont des exemples.

Parmi tous ces travaux, ce sont les résultats exacts qui ont sans doute eu le plus de retentissement. Ils ont suscité des développements en particulier pour les placer dans un cadre mathématique rigoureux. Ils ont également intéressé les physiciens, qui ont cherché à étendre certaines des solutions proposées pour voir dans quelle mesure des résultats obtenus sur des modèles simples exactement solubles restaient valables dans des contextes plus larges. Enfin, ils ont attiré l'attention de chimistes ou de biologistes, par exemple quand il s'est avéré que le modèle à énergies aléatoires pouvait aider à comprendre la question du repliement des protéines ou que leurs travaux sur les fronts bruités pouvaient s'interpréter comme des problèmes de réaction-diffusion ou d'évolution avec sélection.

### **Distinctions**

1977 : Prix Daniel Guinier de la Société Française de Physique

1985 : Prix IBM de Physique

2001 : Grand Prix Ampère de l'Académie des Sciences

2010 : Médaille Boltzmann

2015 : Prix des trois physiciens de l'ENS

<http://www.college-de-france.fr/site/bernard-derrida/index.htm>



## Première année d'enseignement du Pr Derrida

### "Fluctuations et grandes déviations autour du Second Principe"

Depuis le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle le second principe de la thermodynamique est au cœur de notre compréhension des phénomènes irréversibles qui jalonnent notre vie quotidienne. Que l'énergie cinétique d'un véhicule se transforme en chaleur lorsqu'il freine, que la chaleur passe spontanément d'un corps chaud vers un corps froid, qu'il n'existe pas de moteur perpétuel, que l'énergie tende à se disperser par frottement, émission de lumière, de son ou de chaleur, tout cela relève du second principe.

Le Second Principe fut énoncé au 19<sup>ème</sup> siècle bien avant que la nature atomique de la matière ne soit établie puis définitivement démontrée. Ce furent Maxwell et Boltzmann, en élaborant la théorie cinétique des gaz, qui en donnèrent l'interprétation mécaniste où un gaz apparaît comme une assemblée d'un très grand nombre de molécules en perpétuel mouvement et qui s'entrechoquent. Cette description atomiste les força à repenser le second principe en termes probabilistes et à lui donner le statut d'une loi des grands nombres. A l'échelle d'un petit nombre d'atomes ou de petites molécules comme celles qui constituent les briques élémentaires du vivant, le second principe est constamment violé par des fluctuations. Ces fluctuations diminuent quand la taille des objets augmente et dans la majorité des cas deviennent imperceptibles à notre échelle. Mais pour des systèmes suffisamment petits comme des molécules biologiques ou des conducteurs mésoscopiques, elles sont facilement détectables et obéissent à des lois statistiques précises que l'on peut tester expérimentalement.

Tout au long du 20<sup>ème</sup> siècle, la compréhension de la nature de ces fluctuations a fait d'immenses progrès à commencer par la théorie d'Einstein de mouvement brownien, le théorème de fluctuation-dissipation, les relations de réciprocité d'Onsager ou la théorie des transitions de phase. Ces principaux résultats furent obtenus dans le cadre de la mécanique statistique d'équilibre ou proche de l'équilibre. C'est au cours des deux dernières décennies qu'un nombre considérable de travaux ont permis d'étendre certains de ces résultats aux systèmes hors d'équilibre et d'établir des relations fondamentales comme le théorème de fluctuation, les relations de Jarzynski ou l'identité de Crooks. Ces progrès ont conduit à repenser les fluctuations en termes de grandes déviations, à réexaminer les différentes définitions de l'entropie, à préciser les théories permettant de décrire les interactions d'un système avec son environnement.

Le cours 2015-2016, qui se veut être un cours introductif aux systèmes hors d'équilibre, tentera de faire le point sur ces progrès récents, en introduisant le langage des grandes déviations. Il montrera comment bon nombre de résultats peuvent se comprendre facilement dans le cadre de la thermodynamique stochastique. Il décrira par exemple comment, pour un processus de Markov arbitraire, on peut définir des notions comme celles de travail, de chaleur, d'entropie ou d'énergie libre et retrouver ainsi toutes les relations qui précèdent et donc toute la thermodynamique par des calculs élémentaires. Le lien entre travail, entropie et information à l'équilibre et hors d'équilibre sera discuté en particulier pour analyser la borne de Landauer (la chaleur minimale dissipée pour effacer un bit d'information), des paradoxes apparents comme ceux du démon de Maxwell ou de la machine de Szilard, ou encore le rendement des moteurs moléculaires. Seront également abordées certaines idées soulevées récemment sur les limites que le second principe impose aux processus de réplication et de reproduction dans le monde vivant.

*L'ensemble de l'enseignement de Bernard Derrida sera disponible sur [www.college-de-France.fr](http://www.college-de-France.fr)*