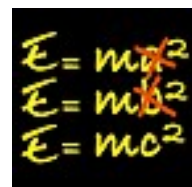


Ludwig Boltzmann, les théories physiques et les atomes


$$E = mc^2$$
$$E = mc^2$$
$$E = mc^2$$

Anouk Barberousse

Institut d'Histoire et de Philosophie des Sciences et des Techniques, CNRS, Université Paris 1, ENS, Paris

Le but de cet article est de présenter succinctement les travaux de Boltzmann, travaux scientifiques bien sûr, mais aussi travaux épistémologiques, moins connus jusqu'à une date récente, dont nous souhaitons montrer la richesse inédite.

Boltzmann fut sans doute le plus grand physicien théoricien de son temps ; Einstein l'appelait dans sa jeunesse *Boltzmann der Großartig*, le magnifique. Bien qu'ayant acquis une réputation internationale – il fit une tournée de conférences aux États-Unis en 1904, ce qui était encore peu courant à l'époque – sa carrière se déroula entièrement à l'intérieur de l'aire linguistique allemande, entre l'Autriche et l'Allemagne, où il occupa diverses chaires (Graz, Vienne, Munich, Leipzig). Aussi convient-il, pour commencer, de replacer ses contributions à la théorie physique dans le climat scientifique et intellectuel de la fin du XIX^e siècle en Allemagne et en Autriche.



Ludwig Boltzmann.

La physique en Europe à la fin du XIX^e siècle

C'est à l'époque de Boltzmann¹ que la physique prend le visage qui nous est familier. Pour mieux cerner sa place dans la physique de la fin du XIX^e siècle, il est tout d'abord nécessaire de préciser d'une part ce que l'on entendait par « physique » et d'autre part, le type d'explications qui étaient alors considérées comme acceptables dans ce domaine.

Rappelons que, du fait du retard qu'a connu sa mathématisation, la « physique » – incluant l'optique mais aussi la théorie de la chaleur – a longtemps été opposée à la mécanique, véritable science mathématique du mouvement. Il a fallu plus d'un siècle pour que, de ce que Newton appelait la

philosophie naturelle, émerge une discipline appelée « physique », dont la mécanique représente une branche particulière. C'est à partir des années 1870 que le métier de physicien devient peu ou prou celui que nous connaissons aujourd'hui : le travail collectif en laboratoire se développe, les universités cessent lentement de ne se consacrer exclusivement qu'à l'enseignement ; les « savants » deviennent des salariés. Le vocabulaire évolue en conséquence : en 1833, William Whewell, dans son effort pour rendre compte de façon systématique du développement des « sciences inductives » (comprendons les sciences empiriques), introduit

pour la première fois le mot « *scientist* » pour distinguer parmi les universitaires ceux qui s'occupent de physique de ceux qui enseignent la philosophie. En 1840, il désigne du nom de « *physicist* » ceux qui, dit-il, font des recherches sur la force, la matière et les propriétés de la matière ; où l'on peut voir en filigrane une définition de ce qui s'entendait par « physique » au milieu du XIX^e siècle.

Cette définition, par sa double allusion à la matière et à la « force » (terme ambigu à une époque où les concepts actuels d'énergie et de force n'étaient pas clairement séparés), indique bien la place encore prépondérante qu'occupait la mécanique dans cette « physique ». Depuis que Newton en avait énoncé les lois et les avait appliquées à l'étude du système solaire, la mécanique était considérée comme *la* théorie physique par excellence, celle que toutes les autres théories devaient imiter, en raison à la fois de sa grande rigueur mathématique et de l'ampleur de ses succès prédictifs. Le développement de la mécanique analytique (Lagrange, Euler) avait encore renforcé le prestige de la mécanique, la faisant apparaître comme une théorie universelle dont les méthodes mathématiques, étonnamment puissantes, semblaient pouvoir s'appliquer à la représentation des phénomènes les plus divers. On en était venu à considérer l'emploi des équations différentielles, outil privilégié de la mécanique analytique, comme un gage de

1. On trouvera dans la bibliographie quelques ouvrages et articles récents sur l'épistémologie de Boltzmann. Plus généralement, la tradition des « savants philosophes », comme Helmholtz, Hertz, Maxwell, Boltzmann, Duhem ou Poincaré connaît un regain d'intérêt de la part des historiens des sciences.



scientificité. Sans aller si loin, au XIX^e siècle, la mécanique apparaissait aux yeux de tous comme une théorie fondamentale ; de modèle théorique à imiter qu'elle était au début de ce siècle, elle était subrepticement devenue la théorie sur laquelle les autres théories devaient se fonder.

D'où l'importance de ce que l'on appelait alors les « explications mécaniques ». Cette expression désignait non seulement les explications qui ne mettent en jeu que des mouvements de morceaux de matière et des forces, mais aussi toute une classe d'explications construites en faisant correspondre à un système qui ne relève pas de la mécanique, un autre système véritablement mécanique, supposé mathématiquement « analogue » au premier. L'analogie entre les deux systèmes était mathématique en ce sens que les lois connues du premier système à étudier étaient supposées posséder la même structure mathématique que celles du système mécanique ; lequel servait ainsi de modèle, à partir duquel on pouvait induire, « deviner », des lois encore inconnues relatives au système non mécanique. Ce type d'explications était particulièrement prisé au Royaume-Uni où elles étaient considérées comme permettant une compréhension optimale des phénomènes. C'est ainsi que Maxwell, Kelvin ou Tait, ont souvent cherché à représenter les phénomènes qu'ils étudiaient par des modèles mécaniques, dans lesquels n'entraient en jeu que des morceaux de matière en mouvement sous l'action de forces diverses. Parmi ces modèles mécaniques, les modèles *atomiques* étaient particulièrement étudiés.

La situation était différente en Allemagne. Le critère qui définissait une bonne explication portait sur l'intervention (ou non) de forces centrales, considérées comme les réalités physiques ultimes ; raison pour laquelle les physiciens allemands rejetaient les représentations mécaniques imaginées alors en vogue en Grande-Bretagne, considérant l'exploration systématique de modèles théoriques, en particulier les modèles atomiques, comme une perte de temps.

L'Autriche, bien que située dans l'aire linguistique germanique, était plus proche du Royaume-Uni que de l'Allemagne en ce qui concerne les habitudes théoriques de ses physiciens. Le milieu des physiciens viennois était favorable à l'atomisme et aux approches théoriques britanniques. C'est en discutant avec Josef Stefan et avec Josef Loschmidt des approches mécaniques « à l'anglaise » et de leurs vertus, que Boltzmann, alors étudiant, acquit le goût de la recherche et des discussions épistémologiques, goût qui ne devait jamais le quitter comme en témoignent ses *Leçons sur la théorie des gaz (Vorlesungen über Gastheorie, parues entre 1896 et 1898)*, rassemblant près de 2 000 pages d'articles sur le sujet. Boltzmann y présente avec le plus grand soin les éléments les plus importants de la théorie, assortis de réflexions théoriques aussi bien qu'épistémologiques concernant la nature de l'irréversibilité ou la justification de l'usage de méthodes statistiques en physique – considérations que Boltzmann admettait comme faisant intégralement partie de la physique théorique (voir Brush, 1976).

Boltzmann partageait ce goût pour la réflexion philosophique avec Maxwell, avec lequel il entretenait une collaboration remarquable par articles interposés, comme cela était souvent le cas à l'époque. L'un et l'autre continuaient de pratiquer ce qui s'appelait autrefois la « philosophie naturelle », à une époque où les effets de la spécialisation accrue se faisaient déjà sentir et où de moins en moins de physiciens possédaient une culture générale suffisante pour cet exercice. Tous deux, entre autres, ont exposé leurs idées philosophiques dans des conférences et aussi, de façon moins appuyée, dans leurs articles de recherche. Tous deux ont exploré les fondements philosophiques de la physique qu'ils développaient, se sont posés des questions de philosophie de la connaissance, se sont demandés ce que c'est que « comprendre » un phénomène. Tous deux ont discuté la signification des concepts de force et de matière, ont examiné le statut conceptuel des lois de la mécanique et de la thermodynamique. Tous deux se sont interrogés sur l'avenir de la nouvelle « science moléculaire » que la mécanique statistique permettait de faire progresser de façon considérable.

Signalons enfin que, à partir de 1902, Boltzmann succéda à Mach à la chaire de philosophie des sciences de l'université de Vienne. Cette chaire avait été créée pour Mach en 1895, et il l'avait intitulée « histoire et théorie des sciences inductives », faisant écho aux travaux de Whewell portant le même titre. Les conférences de philosophie prononcées à cette époque par Boltzmann remportèrent un succès considérable. Comme nous le verrons, il se place dans la lignée directe de Helmholtz, Kirchhoff, Hertz et Mach, lignée qui sera ensuite continuée par Einstein, Schrödinger et Heisenberg entre autres.

Mécanique et probabilités

La plupart des articles que Boltzmann consacra à la théorie cinétique des gaz et à la mécanique statistique sont motivés par la volonté de généraliser les résultats obtenus par Maxwell, tout en améliorant les démonstrations de ce dernier. Par exemple, alors que Maxwell avait montré que la distribution des vitesses des molécules d'un gaz à l'équilibre est stationnaire (c'est-à-dire qu'une fois le système à l'équilibre, la distribution ne change plus), Boltzmann, lui, se proposa de montrer que cette distribution est non seulement stationnaire mais également la *seule* possible à l'équilibre. Il le fit en deux temps. Tout d'abord en 1871, dans l'article intitulé « *Einige allgemeine Sätze über Wärmegleichgewicht* » (Quelques théorèmes généraux sur l'équilibre de la chaleur), il commence par rendre plus rigoureuse la démonstration de la stationnarité de la distribution, déjà donnée par Maxwell, sans rien changer cependant aux hypothèses de base de Maxwell, c'est-à-dire en supposant que, lors des collisions, toutes les directions de rebond sont équiprobables (hypothèse permettant d'introduire des moyennes). L'année suivante, en 1872, toujours dans l'optique d'une



amélioration de la théorie de Maxwell, il entreprend, dans l'article intitulé « *Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen* » (Nouvelles études sur l'équilibre de la chaleur parmi des molécules gazeuses), de montrer que la distribution à l'équilibre – celle dont le nom actuel associe leurs deux noms : la distribution de Maxwell-Boltzmann – est unique. Ce qui le conduit à changer de stratégie et à considérer non pas un système déjà à l'équilibre, mais bien plutôt la manière dont un système initialement hors d'équilibre évolue vers un équilibre (unique). Dans ce dessein, il exploite mathématiquement l'idée selon laquelle c'est la dynamique des collisions individuelles qui, dans un système composé d'un grand nombre d'éléments indépendants, détermine l'équilibre (des constituants rigoureusement indépendants ne peuvent échanger d'énergie ; s'il y a marche à l'équilibre, ce ne peut être qu'en raison des collisions, seul mécanisme capable de produire une redistribution de l'énergie). L'effet de chaque collision est donc étudié pour lui-même *avant* que des calculs de moyenne ne soient entrepris. Plus précisément, Boltzmann introduit une typologie des collisions, les classant selon les énergies cinétiques des particules en jeu, et calcule les conséquences de chacun de ces types de collisions sur l'ensemble du système.

L'examen détaillé de l'effet de la dynamique des collisions sur l'évolution du système conduit Boltzmann à une équation générale d'évolution, dite « équation de Boltzmann », qui joue encore aujourd'hui un rôle fondamental dans la compréhension des phénomènes de transport, c'est-à-dire dans la réponse d'un système à des conditions de déséquilibre². L'important du point de vue épistémologique (et Boltzmann en avait parfaitement conscience) est que cette équation, qui permet de retrouver les lois des phénomènes de transport (macroscopiques), porte sur des variables non pas macroscopiques mais bien microscopiques, une approche amorcée par Maxwell dès 1860.

Dans le même article de 1872, Boltzmann propose en outre une définition microscopique de l'entropie, valable aussi bien à l'équilibre que hors d'équilibre. Il démontre le théorème « fondamental » (plus tard baptisé « théorème *H* ») selon lequel la quantité qu'il appelle alors E (et qui n'est autre, à l'équilibre, que l'entropie de Clausius au signe près) ne peut qu'être constante ou diminuer. Cette quantité E est définie exclusivement à partir de quantités microscopiques. Il y a donc ici un pas théorique d'une importance considérable puisque ce qui est montré, c'est que l'augmentation de l'entropie (c'est-à-dire la diminution de E), grandeur macroscopique, a pour origine des phénomènes microscopiques, à savoir les collisions entre constituants. C'est ce qui permet à Boltzmann d'affirmer que son théorème constitue une

explication microscopique de l'irréversibilité des phénomènes macroscopiques – affirmation justifiée par le fait que ce théorème est le résultat d'une analyse précise des types de collisions et de leurs effets, celle-là même à laquelle est consacrée la première partie de l'article de 1872.

C'est autour du théorème *H* et de sa preuve que se cristallisa le débat sur l'explication de l'irréversibilité, ou, selon l'expression de l'époque, sur le « paradoxe de la réversibilité ». Il s'agit d'un paradoxe apparent, qui naît d'une mauvaise compréhension de la nature *statistique* de l'explication des phénomènes macroscopiques par les lois microscopiques. Boltzmann lui-même, en 1872, n'avait pas clairement perçu l'importance des considérations statistiques dans son raisonnement, et avait tout d'abord considéré qu'il avait donné une « explication mécanique » (au sens précisé précédemment) du deuxième principe de la thermodynamique.

Le paradoxe est le suivant : la mécanique statistique prétend expliquer les lois *irréversibles* du monde macroscopique en se fondant sur des lois microscopiques strictement *réversibles* (qui restent les mêmes après inversion du sens du temps, ou du signe de t dans leur expression). Le « paradoxe de la réversibilité » fut d'abord discuté par Lord Kelvin (c'est-à-dire William Thomson) en 1874, puis porté à la connaissance de Boltzmann par Loschmidt. C'est l'émotion provoquée dans la communauté des physiciens et des mathématiciens par ce paradoxe apparent qui força Boltzmann à revenir sur la démonstration du « théorème *H* », et à clairement mettre en évidence l'existence d'une hypothèse de nature *statistique* dans son raisonnement ; une hypothèse à laquelle il donna le nom de *Stoßzahlansatz*, ou « hypothèse sur le nombre de collisions », encore appelée « hypothèse du chaos moléculaire ». Selon cette hypothèse, le nombre des collisions entre deux particules d'énergie cinétiques données ϵ et ϵ' est proportionnel à la fois au nombre de molécules d'énergie cinétique ϵ et au nombre de molécules d'énergie cinétique ϵ' . Ce qui revient à considérer que les vitesses de deux molécules qui entrent en collision sont *indépendantes l'une de l'autre*, c'est-à-dire à supposer que les molécules ne gardent pas trace des collisions qu'elles ont subies antérieurement. Hypothèse qui va à l'encontre des lois de la mécanique newtonienne dont les équations sont invariantes par rapport au renversement du temps. Le *Stoßzahlansatz*, qui revient à annuler les corrélations entre molécules avant la collision, bien qu'il en apparaisse juste après la collision, introduit une dissymétrie entre l'avant et l'après ; il est donc à l'origine de l'irréversibilité de phénomènes qui, sans lui, seraient parfaitement réversibles. En 1872, Boltzmann n'avait pas jugé nécessaire de rendre cette hypothèse explicite, tant il considérait qu'elle allait de soi. Le débat sur le paradoxe de l'irréversibilité, qui touche à la possibilité de fonder la thermodynamique sur la mécanique newtonienne, l'a forcé à indiquer clairement que cette possibilité n'existe qu'à condition d'introduire en chemin une hypothèse de nature statistique. Ainsi le théorème *H* ne permet-il de passer des lois microscopiques réversibles aux lois macroscopiques

2. Rappelons que l'étude des phénomènes de transport faisait déjà partie de la « science moderne », par exemple la viscosité (équation de Newton), la conduction de la chaleur (théorie de Fourier), la conductivité électrique (théorie d'Ohm).



irréversibles *que* parce qu'il incorpore de façon essentielle la prise en considération du comportement *statistique* des molécules.

Pour de nombreux contemporains de Boltzmann, le scandale du théorème *H* résidait précisément dans l'introduction de cet élément statistique qu'ils pensaient ne pas avoir sa place dans une véritable théorie physique³. Pour les héritiers de Laplace – pourtant auteur du premier grand traité de probabilités – et de Lagrange, les lois de la physique ne pouvaient être que strictement déterministes (au sens de : « pouvant être exprimées par des équations différentielles »). Or l'idée du déterminisme semble incompatible avec celle du *Stoßzahlansatz* ; les effets dynamiques newtoniens ne peuvent pas être « effacés ». En fait, lorsque les particules sont très nombreuses, les corrélations binaires introduites par les collisions ne jouent aucun rôle, car après une interaction entre deux particules données, il y a peu de chances que les mêmes se rencontrent à nouveau dans un délai raisonnable. On a montré bien plus tard que, à la limite où le libre parcours moyen est long comparé aux distances intermoléculaires, le mouvement collectif des molécules tend vers celui qui est décrit par l'équation de Boltzmann. Ce qui justifie *a posteriori* l'hypothèse du *Stoßzahlansatz*.

Boltzmann dut batailler fermement pour faire comprendre la solution qu'il apportait au problème de l'explication microscopique du deuxième principe de la thermodynamique. Un autre « paradoxe » lui fut opposé dans les années 1890, dit de « la récurrence », soumis par le mathématicien Ernst Zermelo et présenté comme contenant une critique dévastatrice de la mécanique statistique dans son ensemble. Le paradoxe de la récurrence trouve son origine dans un théorème démontré par Henri Poincaré en 1890, le « théorème de récurrence », selon lequel la trajectoire d'un système mécanique isolé dans son espace des phases doit revenir avec une probabilité égale à un dans un état arbitrairement proche du micro-état initial du système, au bout d'un temps suffisamment long. Le fait est que les systèmes étudiés par la mécanique statistique sont précisément des systèmes mécaniques isolés, censés atteindre l'équilibre si on les laisse évoluer à partir d'un état hors d'équilibre, en vertu du deuxième principe de la thermodynamique expliqué dans le cadre de la mécanique statistique de Boltzmann par le théorème *H*. Le théorème de Poincaré appliqué aux systèmes de la mécanique statistique semble, quant à lui, indiquer que l'entropie, au lieu de se stabiliser pour toujours une fois que le système a atteint l'équilibre, doit diminuer ensuite, aux moments où le système revient dans un état proche de son état initial ; toutefois, il faut supposer que l'entropie est une fonction des seules variables dynamiques et que le système est fini. Bien que Boltzmann ait très vite trouvé la parade (le temps de

récurrence est tellement gigantesque – de l'ordre de $10^{10^{10}}$ – qu'aucune conclusion physique ne saurait raisonnablement en être tirée ; cette durée tend d'ailleurs vers l'infini avec le volume du gaz), les opposants ne désarmèrent pas. En ce qui concerne l'entropie, la situation est subtile. Dans le cadre choisi par Poincaré (évolution du point et, par suite, évolution de la densité de probabilité dans l'espace des phases selon l'équation de Liouville), l'entropie de Gibbs reste constante. Afin de comprendre la croissance de l'entropie, il faut se placer dans la perspective de la théorie de l'information. L'entropie y apparaît comme un concept statistique et non pas comme une fonction des variables dynamiques.

La théorie des « images »

Outre ses articles strictement scientifiques, Boltzmann a laissé une série d'écrits épistémologiques apparemment difficiles à interpréter et surtout à concilier avec ses prises de position scientifiques. Ainsi, il se refuse à défendre l'hypothèse atomique, lui dont toute l'œuvre scientifique manifeste la fécondité de cette hypothèse. Cependant, en prenant la peine de bien comprendre les écrits philosophiques de Boltzmann, on constate que ses découvertes théoriques, sa réflexion sur la nature des théories et son engagement bien réel en faveur de l'atomisme, forment un assemblage complexe dont les liens internes n'ont rien d'évident ; une complexité dont ne rend pas compte l'image de Boltzmann restée dans la mémoire collective des physiciens, celle d'un savant au destin tragique qui passa toute sa vie à défendre l'atomisme contre les assauts de plus en plus violents de physiciens qui voulaient « s'en tenir aux phénomènes » et qui se suicida l'année même – 1906 – où ses idées triomphaient, grâce aux expériences de Jean Perrin sur le mouvement brownien.

Boltzmann utilisa de façon constante et réfléchie la méthode hypothético-déductive, qui consiste à imaginer des hypothèses expliquant les phénomènes observés, avant d'en déduire des conséquences susceptibles d'être testées empiriquement. Cette méthode s'oppose à celle, strictement inductive, de ses adversaires, au premier rang desquels Ernst Mach et Wilhelm Ostwald, qui affirmaient la nécessité de brider l'imagination créatrice des théoriciens en l'assujettissant aux seuls phénomènes sensibles. Ostwald, tout comme Pierre Duhem, défendaient l'énergétisme, doctrine physico-philosophique selon laquelle l'énergie, quantité mesurable, est *la* quantité physique fondamentale. Leur animosité à l'égard de ceux qui pensaient pouvoir expliquer le monde à l'aide d'objets que personne n'avait jamais vus a parfois pris des formes violentes.

Toutefois, Boltzmann n'a jamais affiché dans le débat sur l'atomisme une position réaliste naïve. Il défendait avant tout la liberté créatrice du théoricien, et militait pour un patient travail d'analyse des concepts mathématiques utilisés en physique. Pour lui, les atomes étaient des

3. Les historiens des sciences ont appelé « révolution probabiliste » l'utilisation progressive des probabilités dans les sciences empiriques au cours des XVIII^e et XIX^e siècles. Voir à ce sujet le livre collectif *The Empire of Chance* (cité dans la bibliographie).



« symboles imaginaires [construits] afin d'obtenir des images qui nous aident à agir correctement ». Cette thèse est le reflet de celles qu'il a par ailleurs développées de façon plus générale à propos de la nature de la représentation scientifique : loin d'être un simple résumé des observations que nous faisons des phénomènes, la représentation scientifique comporte un acte de re-création au sein de modèles mathématiques.

Pour Boltzmann, la science a pour objectif de produire des *explications* des phénomènes. Cette position qui peut nous sembler aujourd'hui bien innocente était fortement combattue, surtout dans les pays de langue allemande, par les représentants d'une autre conception, violemment anti-métaphysique, selon laquelle les explications relèvent nécessairement de la métaphysique et doivent être à ce titre proscrites de l'activité du physicien. La science devrait donc se contenter de produire des *descriptions* simples et économiques pour la pensée, pouvant déboucher sur des prédictions. Kirchhoff, entre autres, a défendu une telle conception.

Alors que Galilée avait (difficilement) convaincu ses contemporains que le véritable but de la physique est la compréhension du monde réel *au-delà des apparences*, Kirchhoff, entre autres, défendait au contraire l'idée que l'homme de science doit s'en tenir aux phénomènes, sans aller chercher quoi que ce soit au-delà. On pourrait, en suscitant le texte de Kirchhoff, lui faire dire que la physique se réduit à des ensembles de formules mathématiques. Cette position n'est pas celle de Kirchhoff, qui est plus subtil, mais certains de ses successeurs n'ont pas hésité à la brandir comme un étendard.

Mach, pour qui le « principe d'économie de pensée » doit gouverner toute recherche scientifique, adopte une position similaire à celle de Kirchhoff : pour lui la science doit avant tout *décrire* les phénomènes. Il va cependant beaucoup plus loin, affirmant qu'il n'existe aucun monde physique au-delà des apparences, de sorte que les atomes et les molécules ne sont pas réels, que l'étude du mouvement doit s'en tenir à la cinématique et que le but premier de la physique est de découvrir, non pas des lois, mais des fonctions mathématiques décrivant les phénomènes de la façon la plus simple et la plus directe.

En réaction à ce courant épistémologique, Boltzmann a développé dès 1890 une conception originale et sophistiquée des théories scientifiques, selon laquelle elles nous donnent des *images* simples et explicatives, qui nous permettent de comprendre le monde qui nous entoure. Ainsi écrit-il : « c'est partout la tâche de la science d'expliquer le plus complexe par le plus simple ; ou, si l'on préfère, de représenter le complexe à l'intuition, au moyen d'images claires empruntées à la sphère des phénomènes plus simples » ; ou encore, « la tâche de la théorie consiste à construire une image du monde extérieur qui existe de façon purement interne et qui doit être notre étoile du berger dans toutes nos pensées et nos expériences ».

Boltzmann n'était pas le seul, en cette fin du XIX^e siècle, à s'interroger sur la nature des théories scientifiques ;

il semble même que cela ait été une préoccupation partagée par l'ensemble de la profession. Hermann von Helmholtz, physiologiste, physicien et philosophe à la fois, fut l'un des premiers à critiquer la conception objective des théories physiques en affirmant que les concepts théoriques ne renvoient pas à des objets physiques réels. Selon lui, comme pour Boltzmann et Hertz, les théories sont des constructions intellectuelles dont la relation aux phénomènes empiriques ne doit pas être tenue pour acquise mais doit au contraire être soigneusement analysée. Hertz, pour sa part, a clairement montré dans l'introduction à ses *Principes de la mécanique* (publiés en 1894) qu'aucune théorie ne peut être absolument « objective », c'est-à-dire coïncider de part en part avec la nature. Il en conclut que la tâche des scientifiques ne peut être de trouver une théorie absolument correcte, mais bien plutôt une « image » qui soit aussi simple que possible et qui représente les phénomènes de la façon la plus précise possible. Pour Hertz, une « image » n'est pas nécessairement une représentation visuelle, mais peut se concevoir comme l'énoncé d'un principe physique. Hertz insiste sur la nécessaire cohérence de nos « images », qui forment des systèmes au sein de la pensée. Wittgenstein, dans le *Tractatus Logico-Philosophicus* (1921) développe et généralise cette approche des rapports entre la pensée et le monde : il ne peut s'agir selon lui d'un rapport terme à terme, et c'est pour cela que nous devons avant tout rechercher la cohérence des images que nous nous faisons du monde.

On retrouve cette même catégorie des « images » chez Boltzmann. Pour lui, la principale caractéristique des images est avant tout la représentation *visuelle*, par rapport à laquelle le formalisme mathématique n'est que second (en cela il s'oppose à Hertz, pour qui les images théoriques valent avant tout par leur forme logique et mathématique). Boltzmann considère que la mécanique est la théorie la plus propre à fournir des images visuelles simples. C'est pourquoi il a, toute sa vie, cherché des explications mécaniques des différents phénomènes qu'il a étudiés. La raison pour laquelle la mécanique fournit selon lui des images satisfaisantes est que les phénomènes les plus simples à concevoir sont précisément ceux du mouvement de particules. Ainsi Boltzmann s'était-il fixé comme but, avec Maxwell et d'autres physiciens, d'expliquer tous les phénomènes connus en faisant appel à la mécanique. Il considérait en effet les images mécaniques comme les plus intelligibles de toutes car elles sont en accord avec les lois de la pensée.

Boltzmann a développé une réflexion riche sur la nature des lois de la pensée, en liaison avec sa théorie des images. Contrairement à une opinion largement partagée, il considérait que les lois de la pensée ne sont pas immuables mais susceptibles d'une évolution de type darwinien, c'est-à-dire qu'elles subissent l'équivalent de la sélection naturelle au cours de l'histoire de la pensée humaine. C'est la raison pour laquelle il ne les croyait pas infaillibles, ni même indépendantes de l'expérience. La conséquence en est que son jugement à propos de l'accord



entre explications mécaniques et lois de la pensée ne doit pas être compris comme impliquant que les explications mécaniques seront de tout temps, et de toute nécessité, les meilleures. Si les lois de notre pensée viennent à changer, alors nous devons peut-être changer nos critères d'explication.

La réflexion de Boltzmann sur les lois de la pensée heurte de nombreuses conceptions courantes de l'époque, mais est en accord avec sa vision darwinienne du monde. Ainsi considère-t-il que les concepts élémentaires de nombre, d'espace et de temps n'existent pas *a priori* (c'est-à-dire constitués en nous indépendamment de toute expérience possible), mais sont bien déterminés par notre expérience sensible. Cette position était aussi celle de Helmholtz qui s'est convaincu au cours de ses travaux de physiologie de la perception que la façon dont nous concevons l'espace, le temps et les nombres est largement guidée par l'expérience sensible. Helmholtz s'oppose en cela à Kant, pour qui le temps et l'espace nous sont donnés indépendamment de toute expérience possible. Pour Kant, le temps et l'espace sont les formes qui rendent précisément possible l'expérience sensible ; ils ne peuvent donc pas en dériver de quelque façon que ce soit. L'influence de Kant a été grande sur les scientifiques allemands du début du XIX^e siècle. Après les travaux et les écrits épistémologiques de Helmholtz cependant, la position empiriste a dominé dans les réflexions des scientifiques, et en particulier des physiciens et des mathématiciens, sur l'espace et le temps (ce retournement a été accompagné et accentué par la découverte des géométries non-euclidiennes).

Les réflexions épistémologiques de Boltzmann s'ancrent dans le débat sur le statut des théories scientifiques comme représentations de la réalité. Ce débat a fait rage à la fin du XIX^e siècle dans les pays de langue allemande entre d'une part les défenseurs d'une vision du monde mécaniste et atomiste, et d'autre part les partisans d'autres conceptions de la nature. Parmi ces autres conceptions, il y a celle qui soutient qu'il faut s'en tenir aux seuls phénomènes sans prétendre décrire la réalité inobservable (phénoménisme), celle qui considère que la quantité fondamentale est l'énergie plutôt que le mouvement d'atomes (énergétisme), ou encore celle qui met les phénomènes électromagnétiques au cœur de toutes choses (vision du monde électromagnétique). L'un des buts de la théorie des images de Boltzmann est de répondre au phénoménisme, dont les partisans attaquent l'atomisme en accusant ses défenseurs d'être naïvement réalistes.

Boltzmann n'a jamais affirmé de façon inconditionnelle la réalité des atomes, mais n'a jamais non plus complètement nié leur existence. Il considérait les « images » atomiques comme des idéalizations utiles qui

n'ont pas à correspondre entièrement à la réalité. À partir des années 1890, il a insisté de plus en plus sur les vertus *pratiques* de l'atomisme. Ainsi souligna-t-il à plusieurs reprises que l'usage d'images mécaniques est plus fécond heuristiquement que celui d'images électromagnétiques ou énergétistes. Dans cette perspective pratique, les atomes lui apparaissaient comme des images indispensables.

POUR EN SAVOIR PLUS

Blackmore J. (ed.), *Ludwig Boltzmann, His Later Life and Philosophy, 1900-1906. Book One: A Documentary History*, Kluwer, Dordrecht, 1995a.

Blackmore J. (ed.), *Ludwig Boltzmann, His Later Life and Philosophy, 1900-1906. Book Two: The Philosopher*, Kluwer, Dordrecht, 1995b.

Ces deux volumes sont à l'origine du renouveau de l'étude des écrits philosophiques de Boltzmann.

Boltzmann L., *Theoretical Physics and Philosophical Problems*, D. Reidel, Dordrecht, 1974.

Une excellente édition en anglais d'écrits épistémologiques de Boltzmann.

Bouveresse J., « La controverse sur l'explication et la description en Allemagne et en Autriche à l'époque de Boltzmann », in Schwartz E. (éd.), *Jules Vuillemin, l'un et le multiple*, Olms, 2004.

Brush S.G., « *The Kind of Motion we call Heat* », 2 vols., North Holland, 1976.

Un grand classique.

De Regt H., « Ludwig Boltzmann's *Bildtheorie* and scientific understanding », *Synthese*, 119, 113-134, 1999.

L'un des articles les plus lisibles et les plus intéressants du numéro spécial de *Synthese* consacré au renouveau des études boltzmanniennes.

Gigerenzer G., Swijtink Z., Porter T., Daston L., Beatty J. and Krüger L., *The Empire of Chance*, Cambridge, Cambridge University Press, 1989.

Un ouvrage de synthèse décrivant la « révolution probabiliste » qui a eu lieu du XVIII^e siècle au XX^e siècle.

Visser H., « Boltzmann and Wittgenstein, or How pictures became linguistic », *Synthese*, 119, 135-156, 1999.

Un autre article du numéro spécial de *Synthese* qui apporte un éclairage intéressant sur la théorie des images.

On peut écouter les conférences du colloque « Ludwig Boltzmann, mathématiques, physique et philosophie » tenu le 22 novembre 2006 au Collège de France sur le site : <http://www.apple.com/fr/quicktime/download/win.html>