

La physique laplacienne dans la seconde moitié du XIX^e siècle: Joseph Boussinesq – la pratique et la réflexion autour de l'atomisme en France vers 1875

João Príncipe
(IHC/CEHFCi – Universidade de Évora)
jpps@uevora.pt

Abstract Joseph Boussinesq is one of the most distinguished French scholars that, during the second half of the nineteenth century, develops the Laplacian program of molecular physics. He made important contributions to the theories of aether, elasticity and hydrodynamics and also wrote on the philosophy of science. I analyze some of the different functions of the atomic assumptions in the theories of laplacian molecular physics. Then I show how Boussinesq assigned a central role to the notion of point atoms in his scientific work and in his philosophical reflections, which concern the method and theory of knowledge. This case study is connected with a critical appraisal of some recent literature on empiricist biased philosophy and history of science.

Resumo Joseph Boussinesq é um dos mais distintos académicos franceses que, durante a segunda metade do século XIX, desenvolveu o programa laplaciano da física molecular. Fez importantes contributos para as teorias do éter, da elasticidade e da hidrodinâmica, e também escreveu sobre filosofia da ciência. Analiso algumas das diferentes funções das hipóteses atómicas nas teorias da física molecular laplaciana. Mostro então como Boussinesq atribui um papel central à noção de ‘átomos-centros de força’ na sua obra científica e nas suas reflexões filosóficas sobre método e teoria do conhecimento. Este caso de estudo relaciona-se com a crítica a alguma literatura recente sobre filosofia e história da ciência de orientação empírista.

Joseph Valentin Boussinesq (1842-1929) est l'un des plus distingués savants français qui au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle poursuit sur la voie du programme laplacien de la physique moléculaire ; il a fait d'importantes contributions à la théorie de l'éther, de l'élasticité et de l'hydrodynamique et a aussi écrit sur la philosophie des sciences. L'analyse de ses travaux et réflexions illumine la question générale du statut et fonction des hypothèses atomiques et peut permettre un aperçu plus complet de l'histoire des atomes.

En *Prologue de problématique*, à propos des différentes lectures philosophiques de l'histoire des théories atomiques, je présente quelques considérations qui visent à mettre en évidence le caractère problématique de certaines généralisations historiques. Dans le paragraphe suivant j'analyse des différents travaux développés dans le cadre de la tradition française de physique moléculaire d'origine laplacienne (ou mécanique physique) du point de vue du rôle joué par les hypothèses atomiques. Dans les deux derniers paragraphes, je montre comment Boussinesq a attribué un rôle central à la notion d'atomes-centres de force dans ses travaux scientifiques, mais aussi dans ses réflexions philosophiques, lesquelles s'occupent de la méthode et de la théorie de la connaissance ; je me concentrerai surtout dans ses travaux publiés avant 1880, en particulier sur son ouvrage *Étude sur divers points de la philosophie des sciences*.

1. Prologue de problématique

Le savant néerlandais Andreas van Melsen à la fin de son histoire des atomes (1949), traduite vers l'anglais en 1952, *From Atomos to Atom*, nous a laissé quelques remarques philosophiques et conclusions générales. Pour lui les conceptions atomiques, dans ce

qu'elles portent de philosophique, ont fait partie, à travers les âges, de ce qu'il appela le fond (background) philosophique des scientifiques, couche de croyances inconscientes, qui dans certains cas ont été consciemment réfléchies, en devenant des convictions philosophiques.¹ Les atomes appartiennent à une classe de préjugés d'origine philosophique sans lesquels les sciences physiques seraient incapables de se constituer. Puisque ce fond reste actif dans l'intellect des scientifiques qui ont développé des théories atomiques après 1800, van Melsen juge que la division en deux périodes historiques, le premier philosophique et le second scientifique, avec une période de transition entre les siècles XVII et XIX, ne saisit pas l'essentiel de l'évolution historique.

Par contre, un ouvrage récent (2006) tranche nettement entre les deux versants que van Melsen jugeait constituer un tout évolutif et complexe. Le titre de l'ouvrage de Alan Chalmers met en évidence nettement la distinction et la discontinuité entre deux discours ou attitudes : *The scientist's atom and the philosophers stone: how science succeeded and philosophy failed to gain knowledge of atoms*. Il juge que les hypothèses philosophiques, ne peuvent qu'être 'accommodées' par l'expérience des phénomènes, ce que les distingue des théories scientifiques à part entière lesquelles peuvent être confirmées directement par l'expérience. Un exemple majeur d'une telle hypothèse philosophique c'est l'atome des philosophes dont la conception remonte aux idées de Démocrite. Après un chapitre à allure épistémologique, dans lequel il fournit des critères permettant de trancher entre les deux domaines, il raconte, avec détail, l'histoire des atomes depuis l'antiquité jusqu'au XX^e siècle. D'après lui, il a fallu attendre la fin du XIX^e siècle pour qu'on puisse trouver une version vraiment scientifique de la théorie atomique. Cette conclusion n'est pas si différente de celle du sens commun, scientifiquement

¹ van Melsen, 1952, 215-216, 218.

renseigné, du début du XX^e siècle, lequel voyait dans les expériences de Jean Perrin sur le mouvement brownien la preuve finale et décisive de la réalité moléculaire. Dans le chapitre sur l'histoire de la physique des atomes pendant le XIX^e siècle, Chalmers ne considère que la théorie cinétique de Clausius, Maxwell et Boltzmann et remarque les anomalies de cette théorie, en particulier le problème des chaleurs spécifiques. Le tout de son argument est biaisé dans le sens de valoriser le contact expérimental avec les atomes, en oubliant d'autres fonctions scientifiques associées à l'hypothèse atomique. Mais en tant qu'ouvrage qui veut arriver à des conclusions philosophiques en partant de l'histoire des sciences, il est difficile à comprendre pourquoi il restreint l'histoire des atomes des physiciens au XIX^e siècle à la théorie cinétique. Van Melsen l'avait fait aussi, mais lui il a écrit son ouvrage à une époque où les historiens des sciences n'avaient pas creusé le riche territoire de la physique moléculaire laplacienne, dont les réussites scientifiques sont indéniables. Après les travaux de Grattan Guiness, Robert Fox, John Heilbron, Bruno Belhoste et Olivier Darrigol, entre autres, il y un matériel assez riche, aussi du point de vue de la philosophie des sciences, lequel, curieusement, avait été cité par le savant-philosophe Émile Meyerson dans son *Réalité et Identité*, ouvrage parue en 1908. La position de Meyerson se trouve aux antipodes de celle de Chalmers ; il valorise la quête de la causalité et ce qu'il nomme le postulat de l'identité dans le temps comme une partie intégrante de notre raison; et il dénonce le biais empiriste, qui concrètement a produit, au début du nouveau siècle, l'effacement d'une partie de l'histoire réelle de la physique:

De là aussi l'illusion, si fréquente chez les savants et même chez quelques philosophes, qui prétendent distinguer la conception atomique spéciale à une partie de la science comme «vérité expérimentale», de la théorie atomique générale qualifiée d'hypothétique, voire même l'ensemble des théories atomiques modernes de celles des anciens, alors qu'il est facile de s'apercevoir

qu'en réalité toutes ses conceptions se tiennent, qu'il y a entre elles une véritable communauté de fond.²

Dans ce qui suit j'illustre ce qu'on peut en profiter de cette connaissance historique pour une philosophie des sciences consciemment non empiriste.

2. La tradition de physique moléculaire

Vers 1870 les savants français commencent à s'intéresser par la théorie cinétique des gaz dans la version de Robert Clausius ; or, la théorie cinétique, dans ses deux versants de théorie sur la nature de la chaleur et de théorie des gaz, aborde des questions déjà agitées par les physiciens français. La réception de la première théorie cinétique des gaz se fait dans des cadres conceptuels dominés par la tradition de physique moléculaire, issue de Laplace, et de la tradition opticienne, issue de Fresnel et de Cauchy. Ces deux traditions, dans leurs explications ou 'déductions', postulent l'existence d'atomes ou de molécules centres de force.³

Le *schéma explicatif général des explications quantitatives de la physique moléculaire* peut être aisément compris en regardant les calculs de Laplace pour la capillarité ou pour l'équation d'état des gaz déduite d'après l'hypothèse du calorique. Dans la sphère d'activité d'une molécule on trouve assez d'autres molécules pour qu'on puisse calculer l'effet des interactions en remplaçant des sommes discrètes par des intégrales. Les forces intermoléculaires deviennent insensibles

² Meyerson, 1908, chap. II, 103-104 de la 3^{ème} édition.

³ Jean Perrin, dans ses réflexions sur les hypothèses atomistiques, a écrit : 'une méthode s'est développée qui consiste à imaginer a priori pour la matière une structure dont la perception directe échappe encore à nos sens imparfaits, et telle que sa connaissance permettrait de prévoir par voie déductive les propriétés sensibles de l'univers'. Perrin, 1903, VII.

à des distances sensibles, ce qui permet de substituer les limites d'intégration finies (correspondant à des distances entre éléments de ligne, de surface ou de volume) par des limites infinies, la valeur des intégrales ayant donc un caractère à peu près universel. En 1821 Navier publia le mémoire dans lequel il donnait les bonnes équations pour le mouvement vibratoire d'un solide élastique isotrope et homogène de type particulier. Ce solide était conçu d'après le modèle laplacien. Il n'avait qu'une seule constante élastique.⁴ Pour Navier, dans l'état naturel du corps, l'attraction et la répulsion entre deux molécules quelconques se détruisent réciproquement. Cet état pour lequel le matériau est dénué de toutes contraintes sert de référence pour les déformations. Dans la théorie de l'élasticité linéaire inaugurée par Cauchy en 1827, les composantes du tenseur des contraintes sont des fonctions linéaires des composantes du tenseur des déformations infinitésimales, ce qui correspond à une généralisation de la loi de Hooke. Pour l'état naturel les deux tenseurs sont nuls. Cauchy a été le premier à appliquer cette théorie aux vibrations lumineuses. Dès le mémoire lu le 12 janvier 1829, il admet que l'éther vibre comme un solide élastique continu isotrope et homogène. Son équation contient deux constantes (dans le modèle de Navier, qui admet que l'interaction entre deux molécules ne dépend géométriquement que de leur distance mutuelle, les deux constantes sont reliées). Nonobstant, en 1839, Cauchy réalisa des calculs d'actions moléculaires pour les solides isotropes (ce qui donnait une condition reliant les deux constantes élastiques de Lamé), et les théoriciens français de l'éther élastique actifs pendant la seconde moitié du siècle

⁴ La principale prévision qui permettait de distinguer l'approche moléculaire de la théorie de l'élasticité de l'approche basée sur le continuum était la diminution du nombre de constantes élastiques indépendantes, Darrigol, 2001, 319.

(tels que Émile Sarrau, Charles Briot ou Boussinesq) sont restés fidèles à la perspective moléculaire.⁵

Bien que les explications moléculaires proposées par Laplace aient un caractère spéculatif et contiennent plusieurs hypothèses ad hoc (le cas typique étant la ‘déduction’ par Laplace de la loi des gaz parfaits, dans le cadre du calorique), la conception des atomes centres-de-force suggérait une théorie de la matière en général. Cet aspect se trouve aussi chez André-Marie Ampère. Il est assez connu qu’Avogadro en 1811, et Ampère en 1814, énoncent l’hypothèse sur la proportionnalité entre les volumes des gaz et leur nombre de molécules. La mathématisation mise en œuvre par Ampère pour sa théorie de la combinaison chimique nécessite une claire distinction atome/molécule d’une part et mélange/combinaison d’autre part.⁶ Mais André-Marie Ampère ne s’est pas limité à ces spéculations chimiques basées sur des conceptions atomiques. Pour lui l’ontologie atomiste constitue une cosmovision. Ampère, par exemple dans son mémoire de 1835 ‘*Sur la chaleur et sur la lumière considérées comme résultant de mouvement vibratoires*’, fait la distinction entre particule, molécule et atome. Les atomes sont des points matériels centres de forces (attractives ou répulsives). Ils s’assemblent en formant des molécules de forme polyédrique, les atomes occupant, en général, les sommets. Les atomes sont toujours tenus à distance par les forces propres des atomes et peuvent vibrer autour de positions moyennes. Les molécules vibrent elles aussi mais on doit distinguer les deux types de vibration :

⁵ Sur l’histoire des théories de l’éther voir : Saint-Venant, 1872; Whittaker, 1951, chap. IV et V; Schaffner, 1972, surtout chap. IV; Buchwald, 1985, Appendix 2. Sur Cauchy voir Belhoste, 1992 ; sur les conceptions atomistiques et finitistes de Cauchy voir ses *Sept Leçons*, Cauchy, 1868 (éditées par L’Abbé Moigno, l’un des grands défenseurs de la physique moléculaire vers 1860 ; voir, par exemple, Moigno 1868).

⁶ Voir Scheidecker-Chevalier, 1997, 170-175.

C'est aux vibrations moléculaires et à leur propagation dans les milieux ambients que j'attribue tous les phénomènes du son ; c'est aux vibrations atomiques et à leur propagation dans l'éther que j'attribue tous ceux de la chaleur et de la lumière.⁷

Les particules sont des assemblages d'un nombre assez grand de molécules, entourées d'éther, et constituant cependant des portions infiniment petites des corps qui ont encore la même nature qu'eux (ce qui signifie qu'une particule d'un corps solide est solide, celle d'un corps liquide est liquide, etc.). Parmi les savants français actifs vers 1870 la théorie ondulatoire de la chaleur méritait encore considération ; cela n'est pas une spécificité française – dans toute la seconde moitié du XIX^e, plusieurs conceptions cinétiques de la chaleur étaient disponibles et quelqu'un comme Clausius acceptait ce pluralisme ou tout au moins le reconnaissait. Cette situation peut être comparée à la multiplicité des théories mécaniques contemporaines de l'éther optique.⁸

La conception atomique du père Boscovich, qui a été adopté par Ampère, est très attirante pour ceux qui veulent réduire la mécanique des systèmes conservatifs à la mécanique de points matériels centre de force.⁹ Cela n'a pas été fait par Ampère qui s'intéressait surtout à la théorie ondulatoire de la chaleur.¹⁰ Parmi les raisons justifiant l'introduction du concept d'énergie au XIX^e siècle, la croyance à la réduction de tous les phénomènes à ce qu'on appelle de nos jours la mécanique des systèmes conservatifs a joué un important rôle dans

⁷ Ampère, 1835, 436.

⁸ Voir Clausius, 1857, Boussinesq, 1873, et Príncipe 2008, § 4.3.3 et § 5.3.

⁹ Sur la conception atomique du père Boscovich voir par exemple Dalmedico, 1989, 81-83.

¹⁰ Cependant, en 1832, il a défini la force vive du mouvement vibratoire, comme la somme de deux termes, lesquels correspondent à notre énergie cinétique et notre énergie potentielle ; Ampère a été le premier à énoncer la constance de cette somme pour le mouvement vibratoire modélisé par l'analogie avec un système de diapasons dans le vide ; voir Darrigol, 2001, 321-322.

les formulations d'un principe de conservation général, faites par Adhémar Barré de Saint-Venant (1797-1886) vers 1830 et par Helmholtz dans son mémoire de 1847. Cette raison a été un peu oublié par les historiens qui ont ignoré le fait que la mécanique de D'Alembert était non conservative, en traitant les mouvements assujettis à des contraintes et considérant des chocs durs : par exemple il considérait comme évident qu'un corps dur se mouvant en direction à un obstacle plan annule soudainement la composante perpendiculaire de sa vitesse. Les traités de D'Alembert et de Lagrange ont été le paradigme de la mécanique rationnelle propagée par les géomètres Laplace et Poisson au moins jusqu'aux années de 1820. Le raisonnement de Saint-Venant peut être mis dans la lignée du principe des forces vifs de Leibniz – la conservation de la force vive dans un système mécanique isolé est justifiée par Leibniz par un argument théologique et par l'impossibilité du mouvement perpétuel. Saint-Venant n'est pas habituellement cité comme étant un de premiers à énoncer le principe général de la conservation de l'énergie. Cela est dû au fait que le mémoire qu'il a présenté à l'Académie des Sciences vers 1828 n'a pas été publié, mais ce mémoire contient explicitement l'idée que la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle est une constante pour l'Univers. Cet Univers est en accord avec la cosmovision laplacienne. Dans les formulations postérieures (1834, par exemple), Saint-Venant abandonne les molécules étendues de Laplace en les substituant par une conception plus simple: celle d'un Univers constitué par des points matériels centre de force. Son argumentation est aussi motivée par un accent théologique favorisant l'idée de permanence.¹¹

¹¹ Sur Saint-Venant, ses convictions atomistiques et la conservation de l'énergie voir Darrigol, 2001, §5 et §6. Puisque dans le cadre de la physique laplacienne, d'autres savants comme Navier et Coriolis, ne pouvaient que trouver naturel le raisonnement mécanique de Saint-Venant, la préférence par l'idée de conservation et permanence, laquelle est équivalente à celle

L'ontologie atomistique était aussi justifiée par des arguments scientifiques à large portée et assez pertinents. Par exemple, Saint-Venant avait démontré en 1844 que l'existence de tensions de cisaillement est incompatible avec un continuum laplacien. Cela se comprend par un raisonnement de symétrie : supposons un solide infini et un plan qui le divise ; dans le cas du continuum laplacien, pour lequel les forces entre ces points sont des forces centrales agissant par paires et ne dépendant géométriquement que des distances, une translation de la moitié supérieure ne produirait pas de contrainte de cisaillement puisque géométriquement la situation resterait telle quelle ; donc un tel matériau serait dépourvu de rigidité. Cette ontologie s'inscrit aussi dans la conviction, très partagée pendant presque tout le XIX^e siècle, de que tous les phénomènes peuvent être expliqués en partant de la mécanique (réductionnisme mécaniste). Saint-Venant, le maître de Boussinesq, a bâti une mécanique dont les postulats affirment que toute la matière est constituée par des points matériels. Darrigol, dans son ouvrage le plus récent, affirme que les théories mécaniques les plus pures sont celle des systèmes à liaisons et celle des systèmes de particules dont l'interaction n'est qu'une fonction de la distance, ce qui souligne la rationalité de l'option de Saint-Venant, Helmholtz et de Boussinesq.¹²

d'échange entre les deux formes d'énergie, ne se justifie que par un penchant métaphysique, lequel est introduit par des arguments théologiques, Dieu étant le créateur et conservateur de toutes les choses ; voir Darrigol, 2001, 330-335.

¹² Voir Darrigol, 2001, §4, pp. 125-126. Cette démonstration a été publiée dans le *Bulletin de la Société Philomathique* le 20 janvier 1844, dans le *Mémoire sur la question de savoir s'il existe des masses continues, et sur la nature probable des dernières particules des corps*, voir Saint-Venant, 1876 ; sur ses contributions pour les fondements de la mécanique, dans la lignée du programme laplacien, voir Jammer, 1957, 132, 215-216 et Darrigol 2014, 40-42 et 58. Sur la rationalité de cette mécanique voir Darrigol, 2014, 58-62 et 75. Sur le rôle central de la mécanique voir Harman, 1982, chap. I.

Vers 1870, les traditions laplacienne et ampérienne avaient porté de nombreux fruits dans les domaines de l'élasticité, de l'hydrodynamique, de la théorie de l'éther élastique, etc. Elles permettaient une cosmovision assurant la cohérence entre les différentes théories, la mécanique céleste ayant un rôle d'archétype ; elles bénéficiaient de l'autorité intellectuelle de grands maîtres comme Newton, Laplace, Fresnel, Ampère, etc. ; et elles avaient une traduction institutionnelle renforcée par le caractère centralisé et hiérarchisé de la communauté savante.¹³ Ces traditions étaient contemporaines d'une attitude d'agnosticisme théorique, issue notamment des travaux expérimentaux et des conceptions de Regnault, lequel ne niait cependant pas l'ontologie moléculaire. Le poids de ces traditions est détectable, par exemple, dans le débat sur l'atomisme à l'Académie des Sciences (1876-1877) ; suscité par le résultat des expériences de Kundt et Warburg sur les chaleurs spécifiques de la vapeur de mercure, en accord avec les calculs de la théorie cinétique pour un gaz monoatomique, $\gamma = 5/3 = 1.66$; l'académicien Yvon Villarceau revendique sa priorité sur le résultat théorique et le chimiste Marcellin Berthelot, répondant à Villarceau, doute du résultat expérimental et affirme : ‘La notion même d’atome indivisible, et cependant étendu et continu, *aussi bien que celle d’un atome doué de masse et cependant réduit à un point matériel*, semble contradictoire en soi’. Villarceau répond à Berthelot que son attitude positiviste, son refus d’accepter des entités inobservables, ne peut servir qu’à ‘retarder indéfiniment les progrès de la science moderne’. Saint-Venant, dans sa réponse, note que la notion d’atome centre-de-force a un long passé qu’il évoque, en citant les noms de Boscovich, Kant, Navier, Poisson et d’autres. L’atome est un être de raison et les répugnances instinctives qu’il peut susciter ont leur origine dans l’imagination humaine,

¹³ Sur les caractéristiques générales de la physique française dans cette période voir Príncipe, 2008, 1^{re} Partie.

laquelle ‘sous l’empire variable des sens, réclamera contre ces êtres sans étendue, comme elle a réclamé si longtemps contre les antipodes, le mouvement de la Terre, la pesanteur de l’air, etc.’. Or, à la lumière de la raison, l’idée d’existence n’implique pas nécessairement l’idée d’étendue. Un point matériel obéissant aux lois de la Mécanique est un être concevable et traitable mathématiquement (et non un esprit). Saint-Venant rappelle au lecteur sa démonstration du fait que la conception de la matière comme une étendue continue implique l’absence de solidité.¹⁴

Il faut signaler, pour être historiquement correct, que si la théorie ondulatoire (ou vibratoire) de la chaleur ait été en faveur pendant les deux derniers tiers du siècle en France cela n’implique pas que beaucoup de physiciens y aient vraiment travaillé. La physique théorique était peu pratiquée (en France comme ailleurs) et la théorie mécanique de la chaleur n’était pas le domaine d’élection pour les théoriciens français, contrairement à la mécanique des milieux continus (incluant l’éther lumineux). Vers 1875, la tradition laplacienne de physique moléculaire, ou mécanique physique à laquelle se rattache la théorie vibratoire de la chaleur, est représentée par des chercheurs illustres comme Saint-Venant ou Boussinesq. Dans l’Académie des Sciences, ils sont surtout cantonnés dans la section de mécanique. Ces savants se sentent menacés et se plaignent du manque de soutien institutionnel. La mécanique physique est sur le déclin dans la seconde moitié du siècle même si elle reste active.¹⁵

Vers 1885, la version ampérienne du programme de la physique moléculaire était encore vivante. Elle garantissait encore une vision

¹⁴ Voir : Villarceau, 1876, 1128 et 1178 ; Berthelot, 1876, 1129 ; Saint-Venant, 1876, 1224-1225 ; Principe, 2008, § 7.1.2.

¹⁵ Ce déclin explique en partie le peu d’intérêt des Français pour la théorie cinétique des gaz. En même temps (et paradoxalement), il est vrai que le maintien de cette tradition sous une forme toujours ampérienne est une autre cause de ce manque d’intérêt, Principe, 2008, Conclusions, 365.

unificatrice des phénomènes, une cosmovision. Donnons un exemple assez significatif de cet état des choses. Jules Violle (1841-1923) est le disciple d'Émile Verdet (1824-1866) qui s'est le plus distingué par ses travaux sur la chaleur (Verdet était le professeur de L'École Normale Supérieure qui connaissait mieux la physique britannique et allemande de son temps). Verdet et Violle appartenaient à la tradition opticienne et ils avaient un intérêt réel pour la théorie cinétique. Les deux appartiennent à l'élite de la physique française. Dans la préface du traité de physique moléculaire de Violle, publié en 1884, on trouve l'essence de cet engagement thématique commun à beaucoup de physiciens français dans la seconde moitié du XIX^e siècle :

Rien dans l'immensité de l'univers n'est immobile. Déplacement de mondes, frémissement d'atomes, tout est agitation et mouvement. La science de la nature tend vers la mécanique par une évolution nécessaire, le physicien ne pouvant établir de théories solides que sur les lois du mouvement. Ces lois deviennent aussi la préface obligée d'un cours de physique. Les phénomènes de la pesanteur en fournissent immédiatement une application simple et grandiose. A l'examen des propriétés générales des corps succède l'étude des mouvements vibratoires qui constituent à proprement parler le véritable champ de la physique. Par un enchaînement rationnel, l'acoustique où ces mouvements sont nettement perceptibles prépare l'optique qui conduit elle-même à la chaleur. En dernier lieu viendra l'électricité, que les connaissances acquises jusqu'à ce jour ne permettent pas de rattacher directement à ces conceptions, bien qu'il soit possible dès maintenant d'y appliquer sans conteste le grand principe de la conservation de l'énergie.¹⁶

La mécanique est donc le pilier de la physique ; la majesté de la mécanique céleste démontre sa supériorité ; la physique moléculaire a comme théorie fondamentale et unifiante la théorie vibratoire, laquelle permet de comprendre le son, la lumière et la chaleur. Pour Violle, le

¹⁶ Violle, 1884, V-VI. Briot, 1869 est un des traités, écrit par un des spécialistes français de l'éther mécanique lumineux, qui met l'accent sur la rationalité de l'ontologie des atomes centres de force.

programme laplacien, dans sa version ampérienne, reste au centre de la structure conceptuelle de la physique.

3. Boussinesq comme théoricien

Boussinesq, né en 1842, a eu un parcours atypique pour un futur académicien. Après des études secondaires au petit séminaire de Montpellier, il obtient sa licence ès sciences (1861) et son doctorat (1867) à la Faculté des sciences de Montpellier. Son premier mémoire, présenté à l'Académie des Sciences en 1865, concerne la théorie de la capillarité et sa thèse doctorale concerne la théorie analytique de la chaleur - *Propagation de la Chaleur (Ellipsoïde des conductibilités linéaires)*. Cette thèse et ses travaux de physique mathématique, publiés avant ses trente ans, ont attiré l'attention de l'académicien Adhémar Barré de Saint-Venant qui est devenu son maître et protecteur. Saint-Venant était un polytechnicien, tardivement devenu membre de la section de Mécanique de l'Institut. Il a joué un rôle fondamental dans l'histoire de la loi de la conservation de l'énergie, dans la théorie de l'élasticité et dans l'hydrodynamique. En 1873, après avoir enseigné les mathématiques dans des collèges en province, Boussinesq est nommé chargé de cours de calcul différentiel et intégral à la faculté des sciences de Lille ; l'année suivante, il sera nommé professeur à cette faculté. Après le décès de Saint-Venant il occupe, en 1886, sa place à la section de Mécanique de l'Académie des Sciences et, cette même année, il devient professeur de mécanique physique et expérimentale à la faculté des sciences de Paris ; dix ans après il y occupera la chaire de physique mathématique et de calcul des probabilités.

Par la suite j'analyserai deux des contributions théoriques de Boussinesq, dans lesquelles les hypothèses atomiques jouent un rôle

central. La première concerne le modèle de l'éther lumineux et est considéré une importante contribution ; la seconde est une nouvelle théorie vibratoire des gaz laquelle est en harmonie avec celle sur l'éther et qui n'arrive pas à dépasser celle de Laplace (basée sur l'hypothèse du calorique), ne permettant donc qu'une déduction de la loi des gaz parfaits.

Pour Saint-Venant, dans une bonne théorie, la simplicité doit aller de pair avec des hypothèses de départ naturelles et une mise en oeuvre analytique qui s'exécute sans longs calculs de manière à se substituer dans l'enseignement ‘aux théories incomplètement mathématiques, dont on a été forcé de se contenter jusqu'ici’. Tel est pour lui le cas de la théorie des ondes lumineuses que Boussinesq publie en 1868.¹⁷ Une des originalités de Boussinesq consiste à s'écartier du débat qui divisait en deux partis ceux qui s'occupaient à l'époque des propriétés de l'éther lumineux dans les milieux matériels. Pour un des groupes, les différences dans les propriétés optiques étaient dues à des variations dans l'inertie de l'éther ; l'autre groupe les attribuait à des variations de ces propriétés élastiques. Boussinesq assume que l'éther a partout la même inertie et la même rigidité. Pour lui, c'est à l'interaction entre l'éther et la matière que sont dues les différences dans les propriétés optiques. Boussinesq fait participer les molécules pondérables aux vibrations de l'éther. Il établit une équation aux dérivées partielles qui met en rapport les déplacements locaux de la matière pondérable et de l'éther, dans laquelle figurent les densités locales de la matière et de l'éther et les deux coefficients élastiques. Boussinesq ne déduit pas l'équation en partant de calculs sur les actions moléculaires ; son point de départ ‘sont les équations différentielles de Lamé, à deux coefficients μ et λ , sans considérer ce qu'ils peuvent représenter d'après les forces individuelles en jeu’. Cela signifie qu'il n'a pas besoin de prendre parti

¹⁷ Saint-Venant, 1872, 35 ; Boussinesq, 1868.

sur la question controversée du nombre de constantes élastiques indépendantes dans un solide isotrope et homogène. Mais la perspective moléculaire apparaît explicitement pour rendre intelligible l'interaction matière-éther ; pour que la nouvelle équation soit traitable, il faut assumer un rapport entre les deux déplacements ; Boussinesq admet que les molécules pondérables et les molécules de l'éther vibrent :

Constamment en concordance comme fait un liquide à l'égard de petits corps qui y flottent ; en sorte que, dès que les molécules éthérees reviennent à leurs positions de repos, les molécules pondérables y reviennent sensiblement aussi, leurs actions mutuelles n'ayant été mises en jeu que d'une manière négligeable vu la petitesse relative de leurs déplacements...

Dans cet extrait, on voit l'importance de pouvoir concevoir les mouvements microscopiques d'après des mouvements simples à notre échelle. La simplicité de l'hypothèse d'un éther unique et homogène, l'usage d'approximations linéaires (par exemple dans le rapport entre le déplacement de la matière et celui de l'éther) et le recourt à une image simple de mouvements moléculaires couplés sont des caractères de rationalité de la théorie prisés par Saint-Venant et par Boussinesq. Mais cette théorie restait incomplète puisqu'elle n'expliquait pas les deux constantes élastiques fondamentales et ignorait le problème des ondes longitudinales.¹⁸

¹⁸ Voir Saint-Venant, 1872, 36-39 ; citation de la page 39. Whittaker note que la théorie de l'éther de Boussinesq est : 'In many respects preferable to its predecessors.... It is Boussinesq's merit to have clearly asserted that all space, both within and without ponderable bodies, is occupied by one identical ether, the same everywhere both in inertia and elasticity; and that all aetherial processes are to be represented by two kinds of equations, of which one kind expresses the invariable equations of motion of the aether, while the other kind expresses the interaction between aether and matter. Many years afterwards these ideas were revived in connection with the electromagnetic theory, in the modern forms of which they are indeed of fundamental importance', Whittaker, 1951, 169. Voir aussi Príncipe, 2008, 136-138.

L'interaction nécessaire entre matière et éther a sûrement favorisé l'incompréhension de Boussinesq vis-à-vis la nouvelle théorie cinétique des gaz, dont la formulation par Clausius (comme Boussinesq le note, l'idée remonte à Daniel Bernoulli) a été la seule connue par lui vers 1870. Dans son mémoire sur la théorie des gaz, de 1873, il propose une théorie alternative. Cette théorie, vouée à l'échec (car en repoussant l'idée d'un mouvement chaotique des molécules, comme dans les théories de Maxwell et de Boltzmann, les phénomènes thermiques ne peuvent pas s'harmoniser avec la mécanique des systèmes macroscopiques, en partant d'un point de vue réductionniste, moléculaire) semble être motivée par le besoin de complétude du cadre conceptuel dans lequel il se meut en tant que théoricien – celui de la mécanique physique, qui a dans la théorie de l'éther élastique et de l'hydrodynamique deux domaines d'élection, des théories où les molécules occupent des positions moyennes fixes. Boussinesq ne s'est jamais intéressé aux formulations sophistiquées de la théorie cinétique de Maxwell et de Boltzmann. Il serait injuste et simpliste d'attribuer cette attitude à une tendance isolationniste puisqu'en hydrodynamique il cite souvent ses collègues anglais. Boussinesq déduit à nouveau la loi de Mariotte, sans mentionner les diverses déductions antérieures, notamment celle de Laplace. Le principe des forces vives joue un rôle central dans le mémoire de Boussinesq ; d'après cette conception le monde serait constitué par un système de points matériels qui échangent des forces conservatives ; cette image atomique, naturelle dans le cadre laplacien, permet l'intelligibilité mécanique de la conservation de l'énergie. Voici sa formulation : Soient n points matériels de distances mutuelles, $r_{12}, r_{13}, \dots, r_{pq}, \dots$; Boussinesq écrit :

$$\frac{1}{2} \sum m V^2 = -\Psi(r_{12}, r_{13}, \dots, r_{pq}, \dots) + C,$$

ce qui correspond à la conservation de la somme des énergies cinétique et potentielle ; Boussinesq décompose l'énergie potentielle, Ψ , en deux parties. La première, l'*énergie potentielle des actions newtoniennes*, se réfère à l'attraction newtonienne s'exerçant à des distances perceptibles. La seconde, l'*énergie potentielle interne*, comprend 'les actions beaucoup plus énergiques qui ne s'exercent qu'à des distances insensibles'.¹⁹

Pour expliquer la fluidité il admet des actions de présence entre molécules pondérables: l'action mutuelle entre deux points matériels dépend non seulement de leur distance mutuelle mais aussi de l'influence d'un certain nombre d'autres points matériels voisins. Ces actions avaient été proposées par des savants britanniques, notamment par Green dans sa théorie de l'éther élastique. Boussinesq décompose l'action entre deux molécules en deux parties. La première explique la solidité et est une fonction de leur distance primitive et de leur écartement (l'état primitif étant d'équilibre stable) ; elle disparaît quand les limites d'élasticité sont dépassées et elle ne peut dépendre que de la seule distance entre les deux molécules, comme dans la théorie de Navier de l'élasticité. La seconde dépend des distances actuelles et aussi des densités actuelles et produit une pression normale à tout élément plan mené dans le corps; cette pression normale devra être une fonction de la densité et de la température.

Boussinesq commence par distinguer les phénomènes lumineux des calorifiques. La propagation de la lumière à travers les corps transparents se fait par ondes régulières – les molécules vibrent à l'unisson avec les atomes qui composent l'éther, les molécules se

¹⁹ Boussinesq, 1873, 314. Cette formulation de la conservation, n'étant pas une nouveauté (bien que son statut de vérité expérimentale n'a pas été établi aussi vite que l'on pense – la thèse doctorale de Jules Violle, de 1870, *Sur l'équivalent mécanique de la chaleur*, concerne encore la détermination expérimentale de cet équivalent) ressemble aux formulations de Saint-Venant (vers 1830) et de Helmholtz (1847), voir Darrigol, 2001, §6.

déplaçant très peu de leurs positions d'équilibre ; les actions réciproques entre les molécules peuvent être négligées et la force vive de l'éther est incomparablement supérieure à la force vive de la matière. Dans ce cas, l'état vibratoire imprimé aux molécules pondérables par les ondulations de l'éther n'est pas concordant avec les états vibratoires que les actions réciproques entre molécules 'tendraient à produire ou du moins à maintenir'.²⁰ Quand la lumière traverse les corps opaques, il y a concordance entre l'état vibratoire de l'éther et les états vibratoires propres des actions réciproques entre molécules. Alors les molécules exécutent d'assez larges oscillations et leur demi-force vive représente la chaleur sensible d'un corps. Dans ce cas, la force vive de l'éther et ses éventuelles actions de présence sur l'énergie propre de la matière pondérable sont négligeables. Il y a une différence fondamentale entre les vibrations lumineuses et les vibrations calorifiques : le caractère erratique des phases de ces dernières vibrations : 'La phase de ce mouvement change extrêmement vite quand on passe d'un point aux points voisins, et j'admettrai qu'elle reçoit à chaque instant ou presque à chaque instant les valeurs les plus différentes dans l'étendue de la sphère d'activité [contenant toujours un grand nombre de molécules voisines] d'une molécule'. Quand un corps transparent est traversé par des ondes d'éther, ce corps transparent a déjà une certaine température, c'est-à-dire un certain état de vibration calorifique, et Boussinesq admet que 'en vertu du principe de la superposition des petits mouvements, les ondes lumineuses...doivent, à fort peu près, se propager à son intérieur comme si cette agitation n'existant pas'.²¹

Comme le calorique chez Laplace et Fourier, l'éther de Boussinesq est responsable de la thermalisation de la matière:

²⁰ Boussinesq, 1873, 335.

²¹ Boussinesq, 1873, 324, 342.

Ce milieu ne peut pas, à cause de sa faible masse, en détenir des quantités sensibles [de l'énergie interne] et il ne fait que la transporter rapidement, par petites charges, d'un corps à l'autre du système, de manière à tendre à établir entre eux et avec lui-même une sorte d'équilibre dynamique appelé *équilibre des températures*.²²

Cependant, Boussinesq reconnaît que ‘le détail des mouvements calorifiques et leur mode de propagation d'une molécule à l'autre nous est inconnu’.²³

Comme Laplace, Boussinesq définit température à partir des propriétés du milieu ténu où se propage le rayonnement calorifique. La différence, c'est qu'il la définit cinétiquement comme dans la théorie d'Ampère : ‘On peut appeler *température absolue* d'un petit volume d'éther la demi-force vive qu'il possède sous l'unité de masse, ou une quantité proportionnelle à cette demi-force. Un corps est dit à une certaine température T , lorsque ces vibrations calorifiques n'augmentent ni diminuent si l'on vient à le placer dans l'éther à la même température’.²⁴

Le mécanisme des chocs de la théorie cinétique de Maxwell-Boltzmann cède la place à la proportionnalité des mouvement de l'éther et des molécules pour le cas d'équilibre thermique, et l'hypothèse du chaos moléculaire a son analogue dans l'hypothèse de chaos dans les phases du mouvement vibratoire calorifique des atomes et molécules. Mais Boussinesq n'arrive pas à introduire un rapport avec le deuxième principe de la thermodynamique, avec l'augmentation de l'entropie dans les processus naturels.

²² Boussinesq, 1873, 308.

²³ Boussinesq, 1873, 339.

²⁴ Boussinesq, 1873, 337. Sur la théorie de Laplace et le calorique voir : Sebastianini, 1981, Sebastianini, 1982, Arnold, 1983, Heilbron, 1993, Principe, 2008, § 4.1. La loi de Stefan-Boltzmann pour le rayonnement noir, dont la déduction (par Boltzmann en 1884) est basée sur la pression du rayonnement et sur des relations thermodynamiques, corrige le supposé rapport linéaire entre la densité d'énergie rayonnante et la température.

4. Les atomes, la méthode et les limitations de notre esprit

Boussinesq est habituellement cité, dans le contexte de l'histoire des idées philosophiques, à cause de ses réflexions sur les conséquences de la 'bifurcation des voies' : dans quelques conditions singulières les équations différentielles qui décrivent le mouvement d'un système mécanique admettent une multiplicité d'intégrales, en partant d'un même état initial ; alors le choix entre ces intégrales pourrait avoir lieu en ne dépensant presque aucun travail ; cela permettrait de concilier le mécanisme avec les phénomènes vitaux et avec la liberté humaine ; ces idées remontent à 1877-78 et Saint-Venant, dans une note à l'Académie des Sciences cite ces travaux de physique mathématique de Boussinesq.²⁵ Ici je m'en occupe d'autres de ses réflexions contemporaines, moins connues, concernant de plus près la question des atomes. Après avoir publié des mémoires remarquables sur la théorie de l'éther élastique, sur l'hydrodynamique et sur la théorie analytique de la chaleur, Boussinesq publie, en 1879, son ouvrage philosophique *Étude sur divers points de la philosophie des sciences*. Dans cet ouvrage les considérations sur les atomes s'encadrent dans les vues générales de l'auteur sur le problème de la connaissance.

Pour Boussinesq l'intelligence humaine n'est pas parfaite. Notre faculté de représentation, appuyée sur la création d'un ordre géométrique objective et universelle, laisse échapper le fond des choses, puisqu'elle constitue un monde de lois et de phénomènes ayant une nature approchée par rapport au vraie ordre physique ; par ses propres mots, notre esprit subit 'un défaut d'adaptation très léger,

²⁵ Voir Fagot-Largeault, 2002, 966-982. Le contexte international de ce débat est discuté dans Strien, 2014.

mais peut-être irrémédiable' ; cette pensée est développée dans le passage suivant :

Les moindres faits observables contiennent tant de complications, il y a peut-être une disproportion si radicale entre leurs plus petits détails et notre intelligence, qu'il nous faut renoncer à saisir les choses absolument tels qu'elles sont. Notre esprit se représente et leur substitue, presque sans s'en douter, des objets abstraits, qui en diffèrent fort peu, et dont les notions sont plus simples, c'est-à-dire plus intelligibles ou mieux adaptées à sa forme propre... notre nature intellectuelle nous... fait remplacer les quantités ou les figures réelles existant hors de nous, et dont l'observation nous fournit seulement une connaissance plus ou moins grossière par les quantités abstraites de l'analyse ou par les figures idéales de la géométrie. Et pourtant, aucun moyen de constatation ne nous donne le droit de regarder celles-ci comme leur étant identiques, bien que les idées que nous en avons présentent seules assez de clarté pour servir de base à nos raisonnements... La réalité est d'ordinaire... si complexe, qu'il nous faut... tolérer dans une première étude des erreurs parfois très appréciables... C'est en procédant ainsi par voie d'approximations successives, dont chacune laissa subsister une erreur plus ou moins petite en comparaison avec des résultats poursuivis, que l'intelligence humaine parvient à démêler, dans les phénomènes naturels, des relations assez simples pour pouvoir les saisir et s'y intéresser.²⁶

Nonobstant, c'est la possibilité de modéliser les phénomènes d'après cet ordre idéal qui les rend intéressants : 'Ces phénomènes... ne nous intéressent, ils ne nous sont même intelligibles, qu'à la condition de reproduire assez fidèlement les traits de certains objets simples de l'ordre géométrique idéal, vrai domaine immédiat de notre esprit'. Le rôle du sujet de la connaissance est donc fondamental dans notre connaissance :

Il est vrai que cette existence du phénomène, en tant que nous lui faisons une place à part, motivée par l'intérêt qu'il nous offre, tient autant à notre manière de voir, à la forme de notre existence, ou du moins à l'analogie qu'il présente avec des réalités d'un ordre supérieur perçues par nous, qu'à son essence même : mais toute science porte inévitablement l'empreinte du *sujet* connaissant, et une loi n'est

²⁶ Boussineq, 1879, 64, 34-35.

naturelle qu'à la condition de se trouver tout à la fois, dans la mesure du possible, conforme à la *nature* de notre esprit et à celle des choses.

Boussinesq admet que cet ordre géométrique constitue un monde à part 'en dehors de nous' (platonisme), ayant une valeur objective, mais parfois il le formule en tant que hypothèse.²⁷

Boussinesq, dans la première étude de l'ouvrage, concernant 'Le rôle et la légitimité de l'intuition géométrique', considère les caractéristiques de cet ordre géométrique. Il y critique ceux qui veulent mettre dans le même plan toutes les géométries en jugeant vague la notion d'intuition géométrique. Cette intuition accompagne ceux qui s'occupent de la géométrie euclidienne, et qui, contrairement aux autres, donne à la notion de similitude une valeur absolue (théorème de Thalès). L'intuition géométrique s'appuie sur des images et donc sur le système visuel :

Le cerveau *pensant* tout entier paraît n'être, à quelques égards, qu'une extension du système visuel, qui est par excellence l'organe de la représentation et des figures. Nous condensons et précisons toutes nos idées par des formes, des constructions idéales, sans lesquelles nous ne parviendrons pas à les fixer, à les voir nettement; et on dirait, que c'est, précisément, dans la mesure où leur assimilation à des images réussit que nous pouvons en faire l'objet de connaissances positives.

Si pour le cas de la géométrie le rapport aux images semble évident, Boussinesq nous souvient que pour l'analyse on travaille avec la correspondance entre les nombres réels et une ligne droite. Aussi, pour l'analyse combinatoire les métaphores empruntées aux choses matérielles sont présentes : disposition, arrangement, substitution, permutation.²⁸

²⁷ Boussinesq, 1879, 36-37. Voici un passage où le ton est hypothétique : 'à supposer même que l'ordre géométrique n'eût pas d'existence hors de nous, qu'il se réduisit à être une pure émanation de l'intelligence humaine, ou mieux, une simplification et une généralisation abstraites, appropriés à notre esprit', Boussinesq, 1879, 49.

²⁸ Boussinesq, 1879, 17-18. La position esquissée par Boussinesq diffère de celle de Louis Liard, dont la thèse, *Des définitions géométriques et des*

Cependant, pour Boussinesq, l'intuition géométrique, laquelle nous procure des totalités saisies avec clarté maximale, bien qu'ayant ses racines dans un sentiment instinctif, appartient à un ordre spécial dont l'essence est idéal. La notion d'espace, étant logiquement antérieure à celle des figures est ‘la plus essentielle qui nous fournisse le sens géométrique’. Or, l'espace est irréductible aux catégories de la substance (dont le paradigme est la notion de matière) et du mode (attribut d'un être réel, c'est-à-dire matériel) ; ces deux catégories sont ‘crées sous la prédominance des sens externes’ et surgissent donc associées aux êtres considérés (physiquement) réels ; en plus ces deux catégories émergent des régions obscures de notre esprit et la région claire ne les reconnaît pas. Cauchy avait déjà jugé l'espace comme infini et dépourvu d'existence, dans une argumentation qui recèle des motivations théologiques (les deux sont des croyants).²⁹

Les savants construisent donc des analogies entre les deux ordres ou mondes – physique ou réel, géométrique ou idéal. Mais la vraie et absolue ressemblance nous échappe, étant le privilège d'une intelligence supérieure qui aurait une connaissance ‘également parfaite, également directe des deux ordres de réalité’ ; cette intelligence ne serait pas condamnée ‘à ne comprendre les choses physiques qu'à la lumière des conceptions géométriques abstraites’ ; ces choses physiques, les ‘phénomènes bruts’ sont régis par des lois inconnues et sans doute inextricables. Nous sommes condamnés à l'emploi d'hypothèses approximatives, accommodées à la faiblesse de l'esprit humain’. Même pour la notion d'espace, Boussinesq juge ‘qu'on doit admettre l'existence de différences très petites entre

définitions empiriques, cite les travaux de Beltrami, traduits par J. Hoüel en 1869, en faveur de l'idée que ‘la géométrie non euclidienne, géométriquement interprétée, est une extension de la géométrie euclidienne’, Liard, 1873, 41. Liard (1846-1917), est un disciple du philosophe néo-kantien Jules Lachelier et deviendra très influent comme directeur de l'enseignement supérieur français.

²⁹ Boussinesq, 1879, 14-15, 19-20 ; voir Cauchy, 1868.

l'espace idéal...et l'espace réel où sont les corps, quoique nous ne puissions fixer ces différences.' Comme Cauchy, il note comme le problème de la divisibilité indéfinie des corps et celui de l'étendue ou de l'inétendue des atomes, montre l'existence d'une "incommensurabilité... subjective ou objective... dans cette question du passage de l'abstrait au concret".³⁰

Boussinesq en décrivant notre faculté de représentation parle des régions clairs de notre esprit et des régions obscures qui semblent être le domaine du sens pratique ou du bon sens, domaine qui nous fournit 'une certaine vue d'une matière continue' dont les plus petites parties doivent être massifs et indivisibles ; ce bon sens qui est commun à tout le monde, y inclus les savants-géomètres, repousse l'idée de la divisibilité à l'infini et donc l'idée d'une matière constituée par 'des petites fractions imaginables...indéfiniment divisibles', comme est le cas des petits atomes étendus des anciens. Ce bon sens se refuse aussi à admettre que la matière soit composée par des atomes ponctuels et massifs, puisque dans ce cas on fait du 'point géométrique qui, pour lui, n'est qu'une abstraction irréalisable ou dépourvue du moins de toute probabilité, la seule réalité matérielle'. Nonobstant, Boussinesq juge que cette conception de l'atome inétendu et centre de force, tel qu'elle a été conçue par le père Boscovich, Ampère, Cauchy ou Saint-Venant, est indispensable aux géomètres, étant la plus simple et la seule qui permet d'expliquer les phénomènes mécaniques - elle est en harmonie avec les régions claires de l'esprit et en 'accord suffisant avec la réalité'. Cette conception suppose que l'espace géométrique ne diffère pas de celui où sont les corps matériels. Puisque notre faculté de représentation est aussi constitué par le sens pratique, Boussinesq croit que l'incompatibilité entre celui-ci et l'hypothèse des atomes inétendus, montre que 'même dans les catégories de la forme et de la quantité, la

³⁰ Boussinesq, 1879, 37, 39, 42, 22.

nature se dérobe en partie à tous les efforts de notre faculté de représentation.' L'ordre géométrique correspond donc aux 'régions claires de notre esprit'. Notre esprit cherche toujours la simplicité et la perfection absolue en utilisant sa faculté d'intuition idéale ou pouvoir de généralisation et sa capacité de déduction (logique). Boussinesq illustre ces considérations avec l'exemple des méthodes de la mécanique physique.³¹

Dans la mécanique physique, on considère les 'déplacements relatifs éprouvés par des parties de matière très voisines'. Ses déplacements sont dus, en général, à des actions de contact, exercées à des distances imperceptibles. Le savant géomètre ne prétend pas évaluer ce qui se passe avec chaque molécule, ce qui serait trop complexe. Le géomètre admet que les irrégularités complexes des mouvements individuels des molécules se neutralisent mutuellement, amenant à la constitution d'un *état moyen local*, lequel varie avec continuité. Le principe de continuité est indissociable de l'utilisation de l'analyse mathématique. La mécanique physique cherche les lois régissant l'évolution de cet état moyen local. La simplicité des lois de la mécanique physique est liée au fait 'que nous observons des effets moyens où les discordances individuelles disparaissent et se neutralisent en vertu de la *loi des grands nombres*'. Boussinesq admet que, au niveau en dessous de celui des moyennes locales, 's'il nous était donné de voir les détails, nous serions tentés, à cause des bornes actuelles de notre esprit, de ne trouver que désordre et incohérence dans le monde des infiniment petits'.³²

Les textes philosophiques de Boussinesq nous renseignent donc sur le rôle paradoxal des atomes ou molécules dans les théories de la mécanique physique. Les atomes sont postulés comme des centres de

³¹ Boussinesq, 1879, 64, 62.

³² Boussinesq, 1879, 62, 28, 29 et 33.

force, d'après une tradition qui remonte à Boscovich. À ce propos, en 1889, Boussinesq écrit :

Le géomètre sent la nécessité de bien se représenter et définir les objets dont il s'occupera. Or il ne parvient à la netteté désirable, dans cette *construction* idéale des phénomènes et dans leur expression analytique, qu'en regardant chaque corps comme un ensemble d'*atomes* sans étendue ni dimensions, dits *points matériels*, dont il voit chacun occuper à tout instant, dans l'espace, une *situation déterminée*... Ce qui oblige à arriver ainsi jusqu'à des éléments sans étendue, jusqu'à des *points*, c'est que, justement les points sont les seuls êtres géométriques dont la situation soit précise... la *distance*, qui est par excellence, dans les phénomènes, la chose mesurable, n'a de sens que lorsqu'elle relie deux points. C'est on le voit, une nécessité logique inhérente à la nature même de l'esprit humain, qui nous fait *idéaliser* de la sorte les éléments matériels... plusieurs géomètres, le P. Boscovich, Ampère, Cauchy, de Saint-Venant, ont-ils regardé cette conception d'atomes sans étendue comme réelle, comme parfaitement conforme à la véritable structure de la matière.

Si Boussinesq évoque des exigences *a priori* du mode de représentation des phénomènes, position vaguement kantienne, il souligne aussi que la position réaliste est tenable car 'les procédés d'observation n'ont jamais reconnu d'erreur dans les conséquences résultant de l'application de nos idées géométriques aux choses'.³³

³³ Boussinesq, 1889, 5-6. Il est difficile d'inscrire le croyant Boussinesq dans une courante philosophique contemporaine ou d'en détecter des inspirations dominantes (sauf pour ce qui concerne son maître Saint-Venant), bien que la question de la conciliation du déterminisme et de la liberté, pour laquelle il a donné un important apport, soit un thème majeur du spiritualisme français, fort influencé par Kant. Il est probable qu'il ait eu connaissance des ouvrages de Cournot (*l'Essai sur le fondement de nos connaissances* est de 1851) et de Renouvier (ses *Essais de critique générale* sont parus en 1854 et 1859). Le phénoménisme de Renouvier refuse l'idée de chose en soi et souligne le rôle des abstractions : 'Les sciences physiques font usage de l'abstraction aussi nécessairement que les sciences logiques... [Elles] séparent les faits selon l'expérience, et isolent parmi les phénomènes... ceux dont il faut obtenir une définition plus précise ou rechercher des rapports particuliers... La considération distincte, dans un corps donné, du poids, de la chaleur... nécessite une suite d'abstractions physiques', Renouvier 1859, 505 ; d'ailleurs Renouvier s'intéressait aux sciences physiques et considérait l'hypothèse de l'éther une partie importante 'd'une théorie générale...de la constitution et des

Boussinesq profite de l'occasion pour expliciter comment cette conception générale permet d'expliquer les propriétés chimiques (existence de molécules diverses, énergie dégagée dans les réactions) et diverses propriétés physiques. La différence entre phénomènes chimiques et physiques, s'explique en supposant que les forces intermoléculaires varient plusieurs fois de signe à des distances insensibles. L'impénétrabilité s'explique en postulant que les actions moléculaires doivent être répulsives et indéfiniment croissantes aux plus petites distances. L'existence de molécules chimiques oblige à supposer que, à des distances de l'ordre de grandeur de leurs dimensions, cette action devient attractive. La conservation de l'énergie dans les transformations d'un système clos se comprend en admettant que les actions moléculaires et atomiques dérivent d'un potentiel, car la dynamique moléculaire obéit alors au principe des forces vives ou de conservation de l'énergie. Ce cadre général cohérent est très attractif, mais, dans les théories concrètes de la mécanique physique, le détail du monde des infiniment petits reste caché :

mouvements moléculaires des corps' dont le caractère hypothétique était mis en relief, Renouvier, 1859, 514 ; sur Renouvier et les sciences physiques voir Schmaus, 2007. Boussinesq ne partage pas du relativisme absolu de Renouvier. Il y a des résonnances platoniciennes dans quelques passages de Boussinesq ; il est probable que Boussinesq ait eu connaissance des écrits du dernier Maine de Biran (Alfred Fouillée est un autre exemple de l'inspiration platonicienne chez les français), ce qui aurait pu favoriser ce penchant. Les réflexions de Boussinesq n'ont pas eu, à ma connaissance, d'écho évident sur les philosophes français contemporains s'intéressant pour l'atomisme ; par exemple l'ouvrage d'Arthur Hannequin, parue en 1895, reste encore trop attachée à une distinction entre cinétisme et dynamisme (comme chez Stallo, dont l'ouvrage de 1881, *Concepts and theories on modern physics*, en est une des principales sources d'inspiration pour Hannequin) ; le concept d'atome centre de force est intenable pour lui (critique ancienne et dont Boussinesq parle) et son argumentation reste essentiellement qualitative ; voir Principe, 2008, § 8.2. La position conservatrice des secteurs philosophiques de l'époque, et la méconnaissance des détails techniques, se trouve aussi dans la méfiance vis-à-vis les géométries non-euclidiennes avant 1890, voir Torretti, 1978, § 4.2.

Les actions, dites *de pesanteur*, s'exerçant aux distances de grandeur notable, peuvent être regardées comme infiniment petites en comparaison de celles, appelées le plus souvent *actions moléculaires*, qui existent entre points matériels, à ces distances absolument insensibles auxquelles se produit le *contact physique* des corps, et dont même la plus grande, dite *rayon d'activité des actions moléculaires*, échappe complètement à nos mesures.³⁴

5. Épilogue

Ce monde des infiniment petits correspond à l'échelle où la mécanique physique postule la constitution atomique. Pour Boussinesq la conception de la matière constituée par des atomes centres de force est donc une exigence *a priori* de la partie claire de notre esprit, c'est-à-dire de celle que rejette les catégories de mode et de substance et qui s'appuie sur l'intuition géométrique. Le sens géométrique a un rapport avec les sens, étant dans une certaine mesure une extension du système visuel, mais il appartient à un ordre idéal dont la perfection est la seule perfection à laquelle on peut accéder puisque l'harmonie avec l'ordre physique et le sens pratique n'est que partielle, ce qui est du à un défaut d'adaptation léger mais irrémédiable, qui nous empêcherait de voir l'ordre dans le chaos dans le monde des infiniment petits pour lequel les bonnes images de ces mouvements nous manquent. Ce monde nous a été dévoilé, dans son comportement chaotique, par Maxwell et par Boltzmann lesquels ont su utiliser des raisonnements statistiques mettant en rapport l'échelle moléculaire et l'échelle macroscopique de la thermodynamique. La crainte du désordre, et l'*habitus* (Bourdieu) théorique de Boussinesq l'ont empêché de s'intéresser aux travaux de Maxwell et de Boltzmann, malgré la reconnaissance de l'insuffisance des méthodes utilisés (évidente pour le cas des gaz), attribués à l'incapacité de notre

³⁴ Boussinesq, 1889, 28.

esprit. Nonobstant, Boussinesq a laissé une œuvre notable dans la théorie des milieux continus et son adhésion à l'ontologie atomiste lui a permis d'avoir une cosmovision du monde physique, ancré sur la mécanique, exigence de l'esprit encore valorisé dans les écrits de Pierre Duhem, et caractérisant une tradition française. Sa valorisation du rôle de l'intuition, de la possibilité d'établir des images ou de rapprocher les phénomènes à des représentations familières, fait songer à quelques des considérations méthodologiques de Maxwell, mais, contrairement à l'écossais, Boussinesq a restreint son cadre de 'themata' en méprisant l'engagement pluraliste, favorisant la prolifération d'approches, aspect auquel Poincaré adhérera.³⁵

³⁵ Sur l'engagement pluraliste de Maxwell et de Poincaré voir Príncipe, 2010 et Príncipe, 2012.

Bibliographie

- Ampère, A.-M., 1835, Note de M. Ampère sur la Chaleur et sur la Lumière considérées comme résultant de mouvements vibratoires. *Annales de chimie et de physique*, 58, 432-444.
- Andler, D. et Fagot-Largeault, A. et Saint-Sernin, B., 2002 *Philosophie des sciences* II, Collection Folio/Essais, Paris, Gallimard.
- Arnold, D. H., 1983, The Mécanique Physique of Siméon Denis Poisson. The evolution and isolation in France of his approach to physical theory (1800-1840), *Archive for the history of the exact sciences*, part I: 28, 243-367; part II: 29, 37-94; part III: 29, 287-307.
- Belhoste, B., 1992, *Augustin-Louis Cauchy: A biography*, New York, Springer Verlag.
- Berthelot, M., 1876, Remarques sur l'existence réelle d'une matière monoatomique, à la suite d'une communication de M. Villarceau, Académie des Sciences. *Compte rendus hebdomadaires des séances*, 82, 1129-1130.
- Boussinesq, J., 1867, Note sur l'action réciproque de deux molécules, Académie des Sciences. *Compte rendus hebdomadaires des séances*, 65, 44-46.
-- 1868, Théorie nouvelle des ondes lumineuses, Etude sur les vibrations rectilignes et sur la diffraction dans les milieux isotropes et dans l'éther des cristaux, *Journal de mathématiques pures et appliquées (Journal de Liouville)*, 13 (2), 313, 425.
-- 1873, Recherches sur les principes de la Mécanique, sur la constitution moléculaire des corps sur une nouvelle théorie des gaz parfaits, *Journal de mathématiques pures et appliquées (Journal de Liouville)*, 18, 305-360. Mémoire présenté à l'Académie des Sciences et des Lettres de Montpellier, le 8 juillet 1872.
-- 1879, *Etude sur divers points de la philosophie des sciences*, Paris, Gauthier-Villars.
-- 1889, *Leçons synthétiques de mécanique générale*, Paris, Gauthier-Villars.
- Briot, C., 1869, *Théorie mécanique de la chaleur*, publiée par M. E. Mascart, professeur au Collège de France, Paris, Gauthier-Villars (1883 - 2^{ème} édition).
- Buchwald, J. Z., 1985, *From Maxwell to microphysics – Aspects of electromagnetic theory in the last quarter of the nineteenth century*, Chicago, University of Chicago Press.
- Chalmers, A., 2006, *The scientist's atom and the philosopher's stone*, Boston studies in the philosophy of science, vol. 279, New York, Springer.

Cauchy, A., 1868, *Sept leçons de physique générale avec appendices sur l'impossibilité du nombre actuellement infini par M. L'Abbé Moigno*, Paris, Les Mondes et chez Gauthier-Villars.

Clausius, R., 1857, Conférences libres de Zurich. Physique. Cours de M. R. Clausius (correspondant de l'Institut). De la nature de la chaleur comparée à la lumière et au son, trad. fr. dans *Revue Scientifique*, 20 Janvier 1866, 121-131.

-- 1869, *Théorie mécanique de la chaleur, deuxième partie*, traduit de l'allemand par F. Folie, docteur ès sciences, professeur à l'Ecole industrielle de Liège, Librairie scientifique industrielle et agricole, Paris, Eugène Lacroix éditeur.

Dalmedico, A., 1989, La notion de pression: de la métaphysique aux diverses mathématisations [Causalité et statut des hypothèses], *Revue d'histoire des sciences*, 42 (1-2), 79-108.

Darrigol, O., 2001, God, waterwheels, and molecules: Saint-Venant's anticipation of energy conservation equation, *Historical studies in the physical sciences*, 31, 285-353.

-- 2014, *Physics and necessity: rationalist pursuits from the Cartesian past to the quantum present*, Oxford UK, Oxford University Press.

Fagot-Largeault, A., 2002, *L'emergence*. In Andler et al. 2002, 939-1048.

Fox, R., 1971, *The caloric theory of gases from Lavoisier to Regnault*, Oxford, Oxford University Press.

Hannequin, A., 1895, Essai critique sur l'hypothèse des atomes, Lyon, Annales de L'Université de Lyon (1^{ère} éd.); 1899 chez Paris, Félix Alcan (2^{ème} édition); 1981, New York, Arno Press.

Harman, P. M., 1982, *Energy, Force and Matter: The Conceptual Development of Nineteenth-Century Physics*, Cambridge, Cambridge University Press.

Heilbron, J., 1993, Weighing imponderables and other quantitative science around 1800, *Historical studies in the physical and biological sciences*, Supplement to vol. 24, Part 1.

Helmholtz, H. von, 1847, Über die Erhaltung der Kraft, Eine physikalische abhandlung, *Vorgetragen in der sitzung der Physikalischen gesellschaft zu Berlin am 23. juli, 1847*, Berlim, Reimer.

Meyerson, É., 1908, *Identité et réalité*, Paris, Félix Alcan (3^{ème} édition 1926).

Liard, L., 1873, *Des définitions géométriques et des définitions empiriques*, Paris, Librairie philosophique de Ladrange.

Jammer, M., 1957, *Concepts of force*, Harvard, Harvard University Press (1962 Harper Torchbooks; 1999 Dover).

Moigno, L'abbé F., 1868, *Physique moléculaire: ses conquêtes, ses phénomènes et ses applications*, Paris, Gauthiers-Villars.

Perrin, J., *Traité de Chimie Physique. Les Principes*, Paris, Gauthiers-Villars.

Príncipe, J., 2008, *La réception française de la mécanique statistique*, thèse présentée pour obtenir le titre de docteur en Epistémologie et Histoire des Sciences et des Techniques, thèse dirigée par Olivier Darrigol, Un. Paris 7.

-- 2010, L'analogie et le pluralisme méthodologique chez James Clerk Maxwell, *Kairos Journal of Philosophy and Science*, 1, 55-74.

-- 2012, Sources et nature de la philosophie de la physique de Henri Poincaré, *Philosophia Scientiae*, 16 (2), 197-222.

Renouvier, C., 1859, *Essais de critique générale. Deuxième essai. L'Homme: La raison, la passion, la liberté. La certitude, la probabilité morale*, Paris, Librairie philosophique de Ladrange.

Saint-Venant, A. B. de, 1872, *Sur les diverses manières de présenter la théorie des ondes lumineuses*, Paris, Gauthier-Villars.

-- 1876, Sur la constitution atomique des corps, Académie des Sciences. *Compte rendus hebdomadaires des séances*, 82, 1223-1226.

Schaffner, K. F., 1972, *Nineteenth-century aether theories*, Oxford, Pergamon Press.

Scheidecker-Chevalier, M., 1997, L'hypothèse d'Avogadro (1811) et d'Ampère (1814): la distinction atome/molécule et la théorie de la combinaison chimique, *Revue d'histoire des sciences*, 50 (1-2), 159-194.

Schmaus, W., 2007, Renouvier and the method of hypothesis, *Studies in history and philosophy of science*, 38, 132-148.

Sebastianini, F., 1981, Le teorie microscopico-caloricistiche dei gas di Laplace, Poisson, Sadi Carnot e la teoria dei fenomeni termici nei gas formulata da Clausius nel 1850, *Physis*, 23, 397-438.

--1982, Le teorie microscopico-caloricistiche dei gas di Laplace, Ampère, Poisson Prevost, *Physis*, 24, 197-236.

Stallo, J., 1881, *The concepts and theories on modern physics*, New York, D. Appleton and Company.

Strien, M. van, 2014, Vital Instability and free will in physics and physiology, 1860-1890, *Annals of science*.

<http://dx.doi.org/10.1080/00033790.2014.935954>. Consulté le 20 Août 2014.

Torretti, R., 1978, *Philosophy of geometry from Riemann to Poincaré*, Dordrecht, Holland, D. Reidel publishing Company.

Van Melsen, A. G., 1952, *From atomos to atom*, New York, Harper Torchbooks.

Villarceau, Y., 1876, Note sur la détermination théorique et expérimentale du rapport des deux chaleurs spécifiques, dans les gaz parfaits dont les

molécules seraient monoatomiques, suivi d'une remarque de M. Berthelot, Académie des Sciences. *Compte rendus hebdomadaires des séances*, 82, 1127-1130, 1175-1178.

Violle, J., 1870, *Mémoire de thèse : Sur l'équivalent mécanique de la chaleur*, Paris, Gauthier-Villars.

-- 1884, *Cours de Physique par J. Violle, Professeur à la Faculté des Sciences de Lyon, tome I: Physique moléculaire*, Paris, G. Masson.

Whittaker, E., 1951-1953, *A History of the theories of aether and electricity*, London, Thomas Nelson and sons (Dover edition, 1989).

How to Conceive the Atom: Imagery vs. Formalism

Giora Hon

(Department of Philosophy, University of Haifa, Israel)

hon@research.haifa.ac.il

Bernard R. Goldstein

(Dietrich School of Arts and Sciences, University of Pittsburgh, USA)

brg@pitt.edu

Abstract Given the belief in the universality of Newtonian mechanics, it is hardly surprising that atomic structure was compared to that of a planetary system, taken as a model for it. However, Heisenberg eliminated all pictures and models from his new theory. While Sommerfeld, the theoretical physicist, stressed the didactic importance of the defunct theory, Reichenbach, the philosopher of science, argued that a researcher cannot do without visualization, although this visualization is the “outer clothing” of the theory and does not represent its conceptual “skeleton”. The problem underlying Reichenbach’s statement may stem from what Born considered the naive assumption that the laws governing the macrocosm and the microcosm are the same. But even Born continued to present the defunct theory as a preliminary step for understanding quantum mechanics, not as a theory of historical interest. The force of the model and its accompanied imagery were apparently too strong to resist.

Resumo Dada a crença na universalidade da mecânica newtoniana, não surpreende que a estrutura atómica tenha sido comparada à de um sistema planetário, tomada como seu modelo. Contudo, Heisenberg eliminou qualquer imagem ou modelo da sua nova teoria. Ao passo que Sommerfeld, o físico teórico, salientou a importância didáctica da defunta teoria, Reichenbach, o filósofo da ciência, argumentou que um investigador não pode trabalhar sem visualização, apesar de esta visualização ser a “roupagem” da teoria e não representar o seu “esqueleto” conceptual. O problema subjacente à posição de Reichenbach pode provir do que Born considerava como a suposição ingénua de que as leis que governam o macrocosmo e o microcosmo são as mesmas. Mas mesmo Born continuou a apresentar a defunta teoria como um passo preliminar para compreender a mecânica quântica, e não como uma teoria com interesse histórico. A força do modelo e a imagética associada eram aparentemente irresistíveis.