

LA SUBSTANCE ÉVANESCENTE DE LA PHYSIQUE

Yves GINGRAS

Une caractéristique frappante, mais peu souvent constatée, de l'évolution de la physique depuis la fin du XVII^e siècle, est sans contredit l'abandon progressif des concepts substantialistes comme fondement ultime de l'explication des phénomènes (tourbillons cartésiens, fluides électriques, calorique, éther, le concept de masse aussi subissant des transformations qui l'ont éloigné de l'idée initiale de "quantité de matière"). Même si l'on admettait avec John Heilbron¹ que ces fluides n'avaient qu'un caractère heuristique — ce qui n'est pas si simple — on ne pourrait nier que leur rôle a longtemps été important car ils ont fait l'objet de nombreuses recherches de la part des physiciens (en particulier dans le cas des tourbillons, de l'éther et même du calorique). Or aucune histoire de la physique ne prend pour objet et ne compare directement la transformation et la disparition de ces substances dans la longue durée.

L'idée de désubstantialisation a bien sûr été mise de l'avant il y a longtemps par les philosophes Ernst Cassirer² et Gaston Bachelard³. Bien que Bachelard ait donné plusieurs exemples de l'évolution des concepts physiques, ses analyses demeurent schématiques et ne peuvent satisfaire complètement un historien des sciences. De plus, ces auteurs n'ont pas tiré toutes les conséquences de leur point de vue. Ainsi, Cassirer insiste sur le passage d'une conception substantialiste à une conception fonctionnaliste mais il n'analyse pas le "mécanisme" qui le rend possible, comme si la mathématisation allait de soi.

1. J.L. Heilbron, "Weighing Imponderables and Other Quantitative Science Around 1800", *Studies in the Physical and Biological Sciences*, Supplement to vol. 24, Part 1 (1993).

2. E. Cassirer, *Substance and function and Einstein's Theory of Relativity*, Authorized translation by W.C. and M.C. Swabey, New York, 1953 [This book is an unabridged reprint of the volume as originally published in (Chicago) 1923].

3. G. Bachelard, *La philosophie du non : essai d'une philosophie du nouvel esprit scientifique*, Paris, 1940 ; *Le rationalisme appliqué*, Paris, 1949 ; *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, 1951 ; *Le matérialisme rationnel*, Paris, 1953.

Bien sûr, il existe une littérature assez abondante sur chacune de ces substances (Aiton pour les tourbillons de Descartes⁴, Fox pour le calorique⁵ et Schaffner⁶ et Cantor et Hodge⁷ sur l'éther, pour ne citer que les principaux) mais rien ne suggère l'existence de relations entre ces différents secteurs de la physique, comme si ces développements étaient indépendants les uns des autres.

En fait, cette situation peut s'expliquer par le fait que, depuis une vingtaine d'années, la tendance est nettement à la "micro-histoire" des sciences et à l'analyse de cas bien délimités dans le temps et dans l'espace — autant l'espace géographique que celui des disciplines. Cette approche a bien sûr des vertus en ce qu'elle nous permet d'approfondir notre connaissance d'épisodes importants de l'histoire mais elle a comme effet pervers de faire perdre de vue les tendances à long terme de l'activité scientifique ; les vecteurs disait Jean Piaget. Or, c'est justement dans la longue durée que notre thèse prend son sens et permet de relier entre eux des processus historiques apparemment indépendants.

La thèse que nous voulons défendre est qu'en prenant pour objet la relation entre mathématisation et désubstantialisation, nous pouvons voir d'un oeil nouveau un certain nombre de problèmes classiques de l'histoire de la physique. Ainsi, dans son ouvrage *The Mechanization of the World Picture*, Dijksterhuis perçoit bien l'importance de la mathématisation de la physique mais demeure enfermé dans l'idée de "mécanisation" et rate ainsi l'impact réel de Newton qui réside justement dans l'abandon de toute tentative de "mécanisation" complète de l'univers physique. De notre point de vue, Newton offre plutôt une "dé-mécanisation de la vision du monde", soit tout à fait le contraire de ce que suggère le titre de l'ouvrage classique de Dijksterhuis. Richard Westfall, dans son livre *The Construction of Modern Science: Mechanisms and Mechanics*, insiste lui aussi sur l'importance de la mathématisation, mais suggère que Newton fait la synthèse des points de vue mathématique de Galilée et mécanique de Descartes, ce qui nous semble erroné.

Nous croyons au contraire que le débat entre Cartésiens et Newtoniens met en évidence l'incommensurabilité de leur point de vue et que le fait que la physique de Newton ait fini par triompher marque une coupure historique et épistémologique dans l'histoire de la physique dont on ne réalise pas complètement l'ampleur. En effet, on insiste plus souvent sur Galilée pour "dater" l'émergence de la physique moderne, alors que nous croyons plutôt que la coupure décisive ne survient qu'avec Newton. Ce n'est d'ailleurs qu'à la lumière

4. E.J. Aiton, *The Vortex Theory of Planetary Motions*, London, 1972.

5. R. Fox, *The Caloric Theory of Gases from Lavoisier to Regnault*, Oxford, 1971.

6. K.F. Schaffner, *Nineteenth-Century Aether Theories*, Oxford, 1972.

7. G.N. Cantor, M.J.S. Hodge (eds), *Conceptions of Ether: Studies in the History of Ether Theories 1740-1900*, Cambridge, 1981.

de cette opposition radicale entre les conceptions newtonienne et cartésienne de la physique que l'on peut comprendre le sort réservé à Georges-Louis Le Sage (1724-1803) et à sa tentative de synthèse de ces points de vue⁸. Notre approche permet aussi de mieux faire ressortir des continuités entre des figures comme Descartes, Le Sage et William Thomson (1824-1907). En effet, replacés dans le mouvement à long terme de désubstantialisation et de mathématisation de la matière, les travaux de Thomson sur l'éther et l'atome tourbillonnaire sont analogues à ceux des partisans des tourbillons de Descartes. L'intérêt de Thomson pour Le Sage s'explique ainsi par sa recherche d'une explication mécanique de la gravitation et n'est pas seulement une curiosité historique comme le point de vue rétrospectif le donne à penser. La difficulté d'admettre la loi gravitationnelle sans fournir d'explication est telle qu'en 1824, Ampère pouvait écrire que "l'attraction (newtonienne) [est] le résultat des mouvements du fluide qui remplit tout l'espace"⁹, alors qu'à l'époque ce genre d'explication "cartésienne" était pourtant abandonné depuis longtemps par les physiciens.

L'incompatibilité des conceptions "chosistes", comme dit Bachelard, et des conceptualisations mathématiques des phénomènes, se traduit chez les physiciens par une crise de l'explication qui resurgit de façon récurrente. De la réaction du *Journal des savants* à la publication des *Principia* de Newton, — selon laquelle il ne s'agissait pas de physique mais de géométrie¹⁰ — à celle de Rutherford pour qui la mécanique quantique fait disparaître toute idée physique¹¹ jusqu'aux débats sur la nature "non-visualisable" de cette nouvelle physique¹², il y a un trait commun qui est la mathématisation croissante et l'abandon des modèles explicatifs fondés sur des substances. C'est d'ailleurs dans ce contexte qu'il faut replacer la critique récente faite par David Bohm¹³ à la physique contemporaine d'être devenue trop "mathématique" au détriment de la partie proprement "physique". Pour prendre un exemple encore plus récent, les différences conceptuelles entre l'électrodynamique quantique et l'électrodynamique stochastique proviennent de leur conception opposée de la nature du champ de photons virtuels qui constitue le vide. Alors que la première théorie n'y voit qu'une technique heuristique de calcul, la seconde donne à ce champ une existence réelle qui influe donc sur les forces qui s'exercent

8. S. Aronson, "The Gravitational Theory of Georges-Louis Le Sage", in D.E. Gershenson, D.A. Greenberg (eds), *The Natural Philosopher*, vol. 3, New York, Toronto, London, 1964, 53-74.

9. Société des Amis d'André-Marie Ampère, *Correspondance du Grand Ampère*, L de Launay (publiée par), Paris, 1936-1943 (3 vols).

10. I.B. Cohen, *The Newtonian Revolution: with illustrations of the transformation of scientific ideas*, Cambridge, 1980.

11. Y. Gingras, "La physique à McGill entre 1920 et 1940: la réception de la mécanique quantique par une communauté scientifique périphérique", *HSTC Bulletin*, 5, n° 1 (1981), 15-39.

12. D. Serwer, "Unmechanischer Zwang, Pauli, Heisenberg, and The Rejection of the Mechanical Atom, 1923-1925", *Hist. Stud. Phys. Sci.*, 8 (1977), 189-256.

13. D. Bohm, D.F. Peat, *Science, Order, and Creativity*, New York, 1987.

sur les particules¹⁴. Sans peut-être le savoir, ces auteurs ravivent ainsi la conception électromagnétique de la nature proposée au début du siècle par Lorentz.

Notre programme de recherche vise donc à montrer qu'il existe une relation étroite entre la "mathématisation" de la physique et la "désubstantialisation" de la matière. Il s'agira de montrer que cette abstraction de plus en plus grande trouve son principe dans la manipulation des symboles mathématiques qui acquièrent une autonomie par rapport aux concepts qu'ils sont censés représenter, et en viennent à n'être définis qu'en relation avec d'autres symboles. Ce faisant, nous donnerons un contenu précis à un thème qui a souvent été abordé de façon générale mais qui n'a jamais été étudié de façon précise : le processus de mathématisation des concepts physiques.

L'idée que l'"essence" de la physique réside dans sa mathématisation croissante est bien sûr ancienne. Elle est au cœur des travaux classiques de Alexandre Koyré et de Eduard Jan Dijksterhuis sur la Révolution scientifique du XVII^e siècle. Elle est aussi reprise par la plupart des historiens de la physique¹⁵. Cependant, il faut bien voir que ces travaux ne posent pas la question des conséquences de cette mathématisation ni des résistances auxquelles elle a donné lieu. Ils n'analysent pas non plus le fait que cette mathématisation entraîne une redéfinition complète de la physique comme discipline visant à expliquer le monde naturel. A l'exception de Norton Wise et de Enrico Bellone, très peu d'historiens ont étudié le rôle *constructeur* des mathématiques dans la définition des concepts physiques¹⁶. Enfin, à notre connaissance, aucun historien n'a suggéré de liens *précis* entre la mathématisation et la disparition graduelle des conceptions substantielles des tourbillons, du calorique, de l'éther et de la masse. Dans son ouvrage récent, Heilbron s'intéresse bien aux substances impondérables au tournant des années 1800 mais n'aborde pas directement les questions qui nous préoccupent ici¹⁷.

Contrairement aux apparences donc, le processus de mathématisation de la physique n'a pas vraiment fait l'objet d'une analyse soutenue. Dans la tradition de Koyré, les travaux des historiens se sont surtout concentrés sur les influences philosophiques sur le courant de mathématisation (Pythagore, Platon, Archimède) sans vraiment aborder la question des conséquences de cette mathématisation sur la transformation de l'objet même de la physique. Prenant

14. B. Haisch, *et al.*, "Inertia as a zero-point field Lorentz force", *Physical review A*, 49, n° 2 (February, 1994), 678-694.

15. R. Westfall, *The Construction of Modern Science: Mechanisms and Mechanics*, New York, 1971 ; T. Frängsmyr, *et al.* (eds), *The Quantifying Spirit in the 18th Century*, Berkeley, 1990.

16. E. Bellone, *A World on Paper. Studies on the Second Scientific Revolution*, Cambridge, 1982 ; N. Wise, "William Thomson's Mathematical Route to Energy Conservation: A Case Study of the Role of Mathematics in Concept Formation", *Hist. Stud. Phys. Sci.*, 10 (1979), 49-83.

17. J.L. Heilbron, "Weighing Imponderables and Other Quantitative Science Around 1800", *op. cit.*

en quelque sorte pour acquis que la physique est mathématique, ils ont accordé peu d'attention aux résistances qu'elle a engendrées, celles-ci étant vues comme un combat d'arrière-garde. Or, les débats autour de la nature des *Principia* de Newton (traité de physique ou de géométrie ?) et du caractère occulte ou non de la gravitation, peuvent être interprétés comme l'expression d'une transformation de la définition même du terme "explication". Pour une physique mécaniste, nécessairement substantialiste, expliquer c'est faire référence à des entités sous-jacentes aux phénomènes dont le comportement rend compte de ces derniers par des forces de contact (impulsions ou collisions). Pour une physique mathématisée comme celle de Newton, expliquer c'est plutôt invoquer les équations qui rendent compte du mouvement à partir d'un nombre limité d'axiomes. Le débat sur les causes occultes est en somme un malentendu sur le sens des mots.

En somme, ce que l'histoire de la mathématisation de la physique fait ressortir c'est le fait curieux que les mathématiques agissent en quelque sorte comme un acide sur des substances qui étaient censées rendre raison des phénomènes, comme si les raisons mathématiques s'opposaient aux raisons physiques, comme le suggérait déjà Aristote lorsqu'il écrivait dans la *Métaphysique* que " (...) L'Astronomie, en effet, a pour objet une substance, sensible il est vrai, mais éternelle, tandis que les autres sciences mathématiques ne traitent d'aucune substance, par exemple l'Arithmétique et la Géométrie." contrairement à la physique dont l'objet est la substance même des choses¹⁸.

LES MATHÉMATIQUES AUX COMMANDES

Mais quel est le "mécanisme" — si l'on peut utiliser ce terme ! — qui expliquerait cette désubstantialisation des concepts physiques ? Nous croyons que ce processus s'explique par l'autonomisation au sein du formalisme des symboles mathématiques représentant les variables physiques. Pour voir concrètement comment cela se passe, prenons un exemple simple : celui de la masse. Pour Newton, la masse est définie comme étant "la quantité de matière". Comme quantité substantielle, elle est bien sûr indépendante de la vitesse, le mouvement seul ne pouvant altérer la "quantité de matière" présente en un point de l'espace. La constance de la masse est donc un corollaire de la définition intuitive et substantielle initiale. Cependant, une fois introduit dans l'équation $F = ma$, le concept de masse acquiert une certaine autonomie par rapport à la définition physique initiale en ce sens que le symbole peut être manipulé dans une suite de transformations mathématiques. Par exemple, si l'on soumet cette équation à une transformation galiléenne, elle demeure invariante. Cependant, si on la soumet à une transformation de Lorentz, les choses

18. Aristote, *Métaphysique*, xii, 1073b, 5-10.

se compliquent et suggèrent, comme on sait, que la masse varie en fonction de la vitesse :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Si l'on s'en tenait à une lecture substantialiste, on pourrait dire que c'est là une illusion formelle et que la masse reste en fait constante, car la quantité de matière n'a pas changé. Si l'on adopte la définition de la masse comme inertie, on dira plutôt que l'inertie augmente avec la vitesse, mais cette interprétation aussi a été contestée, car l'inertie est reliée, dans la définition classique, à la quantité de matière. Quoi qu'il en soit, cet exemple fait bien ressortir le fait que ce sont ici les manipulations mathématiques qui génèrent la réinterprétation du concept de masse et non la réflexion sur sa nature physique.

La relation de dépendance entre la masse et la vitesse ne fait d'ailleurs pas sa première apparition dans le cadre de la physique einsteinienne mais bien dans celui du programme électromagnétique qui vise à rendre compte complètement de la masse en termes de champs électromagnétiques. On pourrait voir là aussi comment les mathématiques agissent comme acide de la substance, ici celle de masse comme quantité de matière¹⁹. Bien sûr les résultats numériques diffèrent de ceux qui seront obtenus par Einstein en suivant une voie cinématique et non plus dynamique, mais le point essentiel ici est de noter que ce sont bien les manipulations mathématiques qui rendent possibles la transformation du concept de masse.

La puissance créative des mathématiques est encore plus frappante dans l'histoire de la dualité onde-corpuscule. En effet, non seulement le concept de photon ne devient-il pour ainsi dire visible que si l'on formule l'équation de Wien en termes d'entropie de l'énergie, comme le fait Einstein en 1905, mais la dualité onde-corpuscule ne devient elle-même pensable que lorsqu'il réussit en 1909 à transformer l'équation de Planck dans le langage des fluctuations d'énergie. C'est alors qu'il peut littéralement voir sur le papier que la lumière est bien la somme de deux termes dont l'un représente la solution correspondant au modèle corpusculaire, l'autre celle correspondant au modèle ondulatoire :

$$\langle E \rangle = h\nu E + \frac{c^3}{8\pi\nu^2} E^2$$

La dualité n'est en fait que l'interprétation physique de cette somme arithmétique qui n'apparaît d'ailleurs que dans le cadre d'un formalisme précis, ici celui de la mécanique statistique.

Le temps nous manque pour multiplier les exemples ou en suivre un plus avant, mais ces indications devraient suffire pour montrer que le mécanisme suggéré peut rendre compte de la désubstantialisation qui accompagne la ma-

19. Y. Gingras, "La dynamique de Leibniz : métaphysique et substantialisme", *Philosophiques : revue de la Société de philosophie du Québec*, XXII, n° 2, (1995), 395-405.

thématisation de concepts physiques d'abord définis intuitivement. Elles devraient aussi montrer l'intérêt d'une histoire de la physique inscrite dans la longue durée et qui renoue ainsi avec une tradition philosophique ancienne mais qui n'a pas encore épuisé sa richesse interprétative aux mains des historiens des sciences.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- S. Bochner, *The Role of Mathematics in the Rise of Science*, Princeton, 1966.
- P. Brunet, *L'introduction des théories de Newton en France au XVIII^e siècle*, Paris, 1931.
- D.M. Clarke, *Occult Powers and Hypotheses, Cartesian Natural Philosophy under Louis XIV*, Oxford, 1989.
- I.B. Cohen, *Franklin and Newton*, Philadelphia, 1956.
- E.J. Dijksterhuis, *The Mechanization of the World Picture : Pythagoras to Newton*, Translated by C. Dikshoorn, Foreword by D.J. Struik, Princeton, N. J., 1986.
- P.M. Harman, *Metaphysics and natural Philosophy : The Problem of Substance in Classical Physics*, Brighton, Totowa, 1982.
- J. Hendry, "The Development of Attitudes to the Wave-Particle Duality of Light and Quantum Theory, 1900-1920", *Annals of Science*, vol. 37 (1980), 59-79.
- M. Jammer, *The Concept of Mass in classical and modern physics*, Cambridge, MA, 1961.
- M.J. Klein, "Mechanical Explanation at the End of the 19th Century", *Centaurus*, 17 (1973), 58-82.
- A. Koyré, *Newtonian Studies*, Chicago, 1968.
- P. Mouy, *Le développement de la physique cartésienne, 1646-1712*, Paris, 1934, [New York, 1981].
- J. Piaget, *Introduction à l'épistémologie génétique*, Tome 3, Paris, 1950 (3 vols).
- K.F. Schaffner, *Nineteenth-Century Aether Theories*, Oxford, 1972.
- J. Seidengart, "Théorie de la connaissance et épistémologie de la physique selon Cassirer", in J. Seidengart (éd.), *Ernst Cassirer : De Marbourg à New York. L'itinéraire philosophique* : actes du Colloque de Nanterre, des 12-14 octobre 1988, Paris, 1990, 159-176.
- J. Seidengart, "Cassirer et la philosophie des sciences en France", *Rivista di Storia della Filosofia*, 4 (1995) 753-783.

D. Serwer, "Unmechanischer Zwang : Pauli, Heisenberg and the Rejection of the Mechanical Atom, 1923-1925", *Hist. Stud. Phys. Sci.*, 8 (1977), 189-256.

L.S. Swenson Jr., *The Ethereal Aether : A History of the Michelson-Morley-Miller Aether-Drift Experiments, 1880-1930*, Austin, London, 1972.

R.A. Watson, *The Downfall of Cartesianism, 1673-1712 : A study of epistemological issues in late 17th Century Cartesianism*, The Hague, 1966 (International Archives of the History of Ideas, II).

R. Westfall, *The Construction of Modern Science : Mechanisms and Mechanics*, New York, 1971.

E.T. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, New York, 1989 (2 vols).

R.S. Woolhouse, *Descartes, Spinoza, Leibniz. The Concept of Substance in 17th Century Metaphysics*, London, 1993.

DE L'HISTOIRE DES TECHNIQUES À LA PHILOSOPHIE DE LA TECHNOLOGIE

Jean C. BAUDET¹

Le problème du rapport entre Science et Technique est central en épistémologie, d'autant plus peut-être aujourd'hui que, sous la forme des "nouvelles technologies", la technique est massivement présente dans les préoccupations de notre temps. Comme cela a souvent été dit, cette omniprésence de la technique s'accompagne paradoxalement d'un important déficit de la réflexion philosophique, comme si le fait technique était oublié, voire forclus² par le philosophe. Nous espérons apporter ici un élément de solution à cette question, en partant d'une analyse des (rares) considérations sur la nature de la technique faites par les historiens des techniques. Notre recherche visant à déterminer le statut épistémologique de la technique, elle est fortement marquée par notre prise de position philosophique, ce qui signifie que nous ne revendiquons d'aucune manière l'objectivité de l'historien ou du sociologue. La question est bien "qu'est-ce que la technique par rapport à la science", non à une époque donnée, comme pourraient le déterminer les historiens, ni dans une société donnée, comme pourraient le préciser les sociologues, mais *en soi*, c'est-à-dire métaphysiquement.

Nous réglons la question terminologique préalable (technique-technologie) par les définitions suivantes. La technologie est l'ensemble des moyens dont disposent les ingénieurs pour résoudre les problèmes qui leur sont posés. La technique est l'ensemble des moyens dont disposent les artisans pour résoudre les problèmes qui leur sont posés. Quand cela ne donne pas lieu à ambiguïté, nous utiliserons également le terme "la technique" pour désigner l'ensemble technique-technologie. Nous résolvons donc la question de la distinction entre

1. J.C. Baudet, "Ambiguïté des relations entre science et technologie", *Technologia*, I (1), (1978), 17-20.

2. C'est G. Hottois qui a utilisé le terme de forclusion, emprunté à la psychanalyse, pour caractériser l'élimination de la technique de son champ de conscience par le philosophe. Voir G. Hottois, *Le Signe et la technique*, Paris, 1984.

DE DIVERSIS ARTIBUS

COLLECTION DE TRAVAUX
DE L'ACADÉMIE INTERNATIONALE
D'HISTOIRE DES SCIENCES

COLLECTION OF STUDIES
FROM THE INTERNATIONAL ACADEMY
OF THE HISTORY OF SCIENCE

DIRECTION
EDITORS

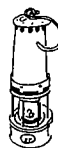
EMMANUEL
POULLE

ROBERT
HALLEUX

TOME 63 (N.S. 26)



BREPOLS



PROCEEDINGS OF THE XXth INTERNATIONAL CONGRESS
OF HISTORY OF SCIENCE (Liège, 20-26 July 1997)

VOLUME XX

SCIENCE, PHILOSOPHY AND MUSIC

Edited by

Erwin NEUENSCHWANDER and Laurence BOUQUIAUX



BREPOLS