

**David Velanes**

*Le Paradoxe du modèle atomique de Bohr.*

*Acte et obstacle épistémologiques dans la conception de la matière*

## 1. Introduction

Depuis l'antiquité grecque, les réflexions sur la nature de la matière sont une source d'interrogation qui aiguise l'imagination et la raison humaines. Dans l'Antiquité classique, les premières doctrines atomistiques émergent à travers les réflexions de Leucippe et de son disciple Démocrite, d'une part, et d'Epicure et Lucrèce, d'autre part. Bachelard explique dans l'introduction de son ouvrage *Les intuitions atomistiques* (1933) que les idées de ces auteurs ne doivent pas être considérées comme similaires, car elles révèlent des tendances métaphysiques opposées, deux *directions épistémologiques*<sup>1</sup>.

Les idées de Démocrite seraient plus proches de la métaphysique idéaliste, tandis que celles de Lucrèce seraient plus proches de la métaphysique réaliste<sup>2</sup>. Ces deux formes explicatives voyageront à travers les âges. De « [...] Démocrite à Lucrèce, une contradiction s'est installée dans l'hypothèse atomique et que deux grandes doctrines, réunies sous le même signe, mais d'aspirations et de destins divers, vont de conserve jusqu'aux âges scientifiques »<sup>3</sup>.

L'histoire des doctrines atomistes est beaucoup plus complexe que ce que l'on pourrait penser si l'on s'en tenait aux doctrines de Démocrite et de Lucrèce. Comme l'écrit Luthy<sup>4</sup>, jusqu'en 1900 l'histoire de l'atome montre une véritable confusion entre différentes conceptions sur la nature intime de la matière. C'est pour cette raison que Bachelard propose un essai de classification mettant en évidence quatre bases historiques, à savoir, l'atomisme réaliste, l'atomisme positiviste, l'atomisme criticiste et l'atomisme axiomatique, afin de rendre les intuitions atomistes plus compréhensibles.

Cet ouvrage bachelardien est important pour la compréhension de sa philosophie de la mécanique quantique, puisque le philosophe de Bar-sur-Aube y présente

<sup>1</sup> Bachelard, G., *Les intuitions atomistiques*, Paris, J. Vrin, 1975, p. 5.

<sup>2</sup> *Ibidem*, p. 9.

<sup>3</sup> Bachelard, G., *Les intuitions, op. cit.*, p. 1-2.

<sup>4</sup> Cf. Luthy, C., « On Atomistic Intuitions and their Classifications », in *Kairos – Revista de Filosofia & Ciência*, 2012, n. 5, p. 167.

certaines de ses notions fondamentales, telles que la relation *abstrait-concret*, qui fonde sa notion de *phénoménotekhnique*<sup>5</sup> qui est développée dans ses œuvres ultérieures, l'idée de la pensée axiomatique comme fondement de la physique contemporaine et l'idée de *rupture épistémologique*.

On peut dire que l'idée de l'atomisme axiomatique se présente comme un point paradigmatique de discontinuité épistémique par rapport aux autres formes d'atomisme antérieures au XX<sup>e</sup> siècle. Il faut noter que, malgré la découverte de la constante *h* par Max Planck, en 1900, la révolution de la raison la plus évidente en atomistique est instituée à la suite des études du physicien danois Niels Bohr qui, en 1913, a introduit cette constante dans le modèle atomique planétaire d'Ernest Rutherford, permettant un grand progrès dans la compréhension des phénomènes de la matière. Ainsi, Bohr a particulièrement contribué au développement de la théorie quantique.

Néanmoins, Bachelard a montré que les connaissances scientifiques progressent continuellement. La raison est en constante mutation, car elle rectifie les connaissances antérieures. Le savoir rationnel se réorganise, se refait, crée des crises en soi, en quelques mots, la raison recommence toujours<sup>6</sup>. Ce mouvement s'observe bien dans l'histoire du savoir scientifique qui est marquée par des erreurs rectifiées dans le sens de la connaissance objective. Le modèle atomique planétaire de Bohr n'a pas échappé à ce processus. Si, dans un premier temps, il a permis une avancée significative des connaissances scientifiques vers une meilleure compréhension de la matière, il est devenu, dans un second temps, un élément de perturbation de sa connaissance. C'est ce paradoxe que cet article vise à démontrer à la lumière des idées bachelardiennes.

## 2. Le modèle atomique de Bohr comme *acte épistémologique*

En 1911, les recherches du physicien et chimiste néo-zélandais Ernest Rutherford sur l'interaction des rayons alpha, qui sont des rayons émis sous forme de radiation, l'ont conduit à proposer un nouveau modèle atomique planétaire dans l'histoire de l'atomisme<sup>7</sup>. Dans ses expériences, Rutherford a constaté que cer-

<sup>5</sup> Cf. Bachelard, G., *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, P.U.F., 1965, p. 91-92.

<sup>6</sup> Bachelard, G., *L'engagement rationaliste*, Paris, P.U.F., 1972, p. 49.

<sup>7</sup> Est-il besoin de dire que le premier modèle atomique planétaire de l'histoire de l'atomisme à contribuer aux progrès de la physique atomique fut celui de Hantarô Nagaoka (1865-1950) en 1903. Cet auteur est inconnu de Bachelard dans son épistémologie. On pourrait alors se demander : pourquoi Bachelard aurait-il omis les conceptions atomistiques du physicien japonais ? Peut-être que son but est de démontrer la rupture entre la physique classique et la physique quantique, dans laquelle les études de Bohr ont un rôle indéniable. En tout cas, une analyse des conceptions de Nagaoka à la lumière des idées bachelardiennes serait intéressante, tant pour les études bachelardiennes que pour les études de philosophie de la physique quantique. Une analyse qui ne peut évidemment pas être élaborée dans cet article. Cf. par exemple, Fiolhais, M – Ruivo, M. C., « O modelo atómico saturniano de Nagaoka », in *Gazeta de Física*, vol.19, 1996, p. 6-10.

taines des particules alpha « [...] ont subi une très forte déviation, qui pourrait s'expliquer en considérant que toute la charge positive de l'atome était concentrée dans de très petites régions, de sorte que l'atome pouvait être imaginé comme un système solaire en miniature »<sup>8</sup>.

Le modèle atomique proposé par Rutherford, lors de l'étude de l'atome de carbone, était composé d'un noyau de charge électrique positive et d'électrons de charge négative qui circulaient à grande vitesse autour du noyau. Les électrons tournaient selon des trajectoires circulaires autour du noyau, tout comme, par analogie, les planètes tournent autour du Soleil. Avec son modèle, le physicien a pu expliquer le problème de la stabilité de la matière, un des axes centraux de sa recherche scientifique. Cependant, ses explications ont vite révélé des complications à la lumière de la théorie électromagnétique, ce qui a suscité des réserves de la communauté scientifique.

L'électron qui a une charge électrique, rayonnerait de l'énergie jusqu'à ce qu'il entre en collision avec le noyau de l'atome. Cela signifierait donc qu'il n'y aurait aucune stabilité dans la structure de la matière. C'est une conclusion qui entre en contradiction avec le fait que la matière reste stable. Par conséquent, le problème fondamental du modèle atomique du physicien néo-zélandais était directement lié à la stabilité de l'atome.

Selon Heisenberg, l'explication de Rutherford sur la stabilité de l'atome était quelque chose d'étrange, puisqu'aucun système planétaire, suivant les lois de la mécanique classique, ne retrouverait sa forme initiale après une collision avec un autre système. Cela ne se produit pas dans le domaine atomique dès lors qu'un « [...] atome de carbone restera un atome de carbone même après toute collision ou interaction par liaison chimique »<sup>9</sup>.

L'incohérence de la théorie de Rutherford a été rectifiée en 1913 par Niels Bohr, un physicien danois, dans sa trilogie *On the constitution of atoms and molecules*<sup>10</sup> où il a appliqué la constante de Planck  $h$ , c'est-à-dire l'hypothèse du quantum (l'idée que l'énergie ne peut être émise ou absorbée que par quanta) dans cette forme de représentation de l'atome. Le modèle atomique de Bohr a été construit non seulement à partir de faits expérimentaux, mais aussi de la quantification d'énergie de Planck. « Si l'atome ne peut changer son énergie que par quanta discrets, cela doit signifier que l'atome ne peut exister que dans des états stationnaires discontinus, dont l'état à plus basse énergie est l'état normal de l'atome. Par conséquent, après n'importe quel genre d'interaction, l'atome finira toujours par retomber dans son état normal »<sup>11</sup>.

<sup>8</sup> Freire Junior, O. – Carvalho Neto, R., *O universo dos quanta: uma breve história da física moderna*, São Paulo, FTD, 1997, p. 29.

<sup>9</sup> Heisenberg, W., *Physique et philosophie: la science moderne en révolution*, Paris, Albin Michel, 2018, p. 18-19.

<sup>10</sup> Cf. Bohr, N., *Sobre a constituição de átomos e moléculas*, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 2001.

<sup>11</sup> Heisenberg, W., *Physique et philosophie, op. cit.*, p. 18.

Grâce à cette innovation, Bohr a résolu le problème de stabilité de la matière et a ouvert de nouvelles voies de recherche sur le monde atomique engendrant une rupture épistémologique.

[...] la théorie des quanta doit son fondement le plus solide au développement de la théorie atomique par Niels Bohr. C'est la première théorie qui, soutenue par le quantum d'action, a pu trouver la clé pour entrer dans le domaine mystérieux de la spectroscopie. Depuis la découverte de l'analyse spectrale, toutes les tentatives d'explication des phénomènes qu'elle a révélés ont été vagues. Dès que la voie d'accès a été trouvée avec la théorie de Bohr, il y a eu une avalanche de nouvelles connaissances dans ce domaine et dans tous les domaines connexes de la physique et de la chimie.<sup>12</sup>

David Velanes

Le modèle de Bohr établit deux types d'état, fondamental et excité. Le premier se trouverait dans l'orbite la plus proche du noyau atomique. Le second correspondrait aux orbites les plus éloignées. Les orbites des électrons cessent d'être continues et deviennent discrètes. L'électron « se trouve » sur des orbites bien définies et son passage d'une orbite à l'autre n'est pas continue. Ainsi, Bohr a expliqué le mouvement des électrons qui *sautent* (saut quantique) d'une orbite à l'autre lorsqu'ils absorbent ou émettent un quantum d'énergie lumineuse, c'est-à-dire d'un photon<sup>13</sup>. « [...] Quand un électron passe d'un niveau plus énergétique à un niveau moins énergétique, il émet un quantum de lumière dont la valeur correspond à la différence d'énergie entre les deux niveaux »<sup>14</sup>.

À la lumière des idées de Bachelard, on peut dire que l'atome de Bohr était une rectification conceptuelle du modèle de Rutherford qui comportait une erreur fondamentale. Bohr, en introduisant la constante de Planck  $h$ , a rectifié cette erreur. Dans *Essai sur la connaissance approchée* (1928), Bachelard explique la réalité du mouvement rectificateur de la raison qui impose un dynamisme au savoir. Selon lui:

Rien de plus clair et de plus captivant que cette jonction de l'ancien et du nouveau. La rectification est une réalité, mieux, c'est la véritable réalité épistémologique, puisque c'est la pensée dans son acte, dans son dynamisme profond. On n'expliquera pas la pensée en faisant un inventaire de ses acquisitions, une force la parcourt dont il faut rendre compte.<sup>15</sup>

Une rectification est toujours la correction d'une erreur. Par conséquent l'importance de l'erreur se révèle comme quelque chose d'utile, de normal et de

<sup>12</sup> Planck, M., *Autobiografia científica e outros escritos*, tr. por. par E. dos Santos de Abreu, Rio de Janeiro, Contraponto, 2012, p. 130, (*Scientific autobiography and other papers*, London, Williams and Norgate, 1950).

<sup>13</sup> Heisenberg, W., *Physique et philosophie*, op. cit.

<sup>14</sup> Pessoa Junior, O., « Introdução histórica à Teoria Quântica », *Cadernos de Física da UEFS*, n° 04, 2006, p.92.

<sup>15</sup> Bachelard, G., *Essai sur la connaissance approchée*, Paris, J. Vrin, 1969, p. 300.

positif<sup>16</sup> dans le mouvement de la connaissance. Et Bachelard écrit : « Erreur, tu n'es pas un mal »<sup>17</sup>. Ses travaux soulignent qu'il ne peut y avoir de certitude à propos d'un savoir déjà établi, un savoir déjà objectivé. Toute conviction sur une idée qui n'est pas soumise à l'analyse discursive est susceptible de produire une connaissance erronée.

Si l'on considère la rectification du modèle atomique de Rutherford par Bohr à la lumière des idées de Bachelard, on pourrait dire qu'il s'agit d'un véritable *acte épistémologique* dans le même sens qu'Einstein a fait avancer la physique avec sa théorie de la relativité restreinte. La définition de Bachelard de ce concept est claire : « la notion d'actes épistémologiques que nous opposons aujourd'hui à la notion d'obstacles épistémologiques correspond à ces saccades du génie scientifique qui apporte des impulsions inattendues dans le cours du développement scientifique »<sup>18</sup>. Cet *acte* est marqué par les rectifications discursives qui se produisent au sein de la connaissance scientifique dans sa démarche historique établissant des ruptures brusques. Alors, cette notion permet de comprendre le dynamisme du savoir qui fait l'objet d'une réorganisation rationnelle incessante.

[...] le progrès est la dynamique même de la culture scientifique, et c'est cette dynamique que l'histoire des sciences doit décrire. Elle doit décrire en jugeant, en valorisant, en enlevant toute possibilité à un retour vers des notions erronées. L'histoire des sciences ne peut insister sur les erreurs du passé qu'à titre de repoussoir.<sup>19</sup>

Toujours dans *l'Essai sur la connaissance approchée* (1928), Bachelard affirme que dans l'évolution historique des connaissances « [...] on ne peut cacher de véritables ruptures, des mutations brusques, qui ruinent la thèse de la continuité épistémologique »<sup>20</sup>. On peut donc dire qu'avec les études de Bohr, la physique entre dans une nouvelle ère, car une *rupture épistémologique* est établie. La mécanique quantique, ainsi que la théorie de la relativité, représentent chacune une révolution de la raison qui a établi des relations épistémologiques sans précédent au XX<sup>e</sup> siècle<sup>21</sup>. Aucune connaissance préalable ne peut contribuer positivement à la compréhension des « phénomènes » dépourvus de contexte historique. Dans cette perspective, Bohr affirme que :

Notre pénétration dans le monde des atomes, autrefois interdite aux yeux de l'homme, est en fait une aventure comparable aux grands voyages de découverte des circumnavigateurs et aux explorations audacieuses des astronomes dans les profondeurs de l'espace céleste. Comme nous le savons, le merveilleux développement de l'art de l'expérimentation physique a non seulement éliminé les derniers vestiges de l'ancienne croyance selon laquelle la précarité de nos sens nous empêcherait en permanence

<sup>16</sup> Bachelard, G., *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, J. Vrin, 1977, p. 243.

<sup>17</sup> *Ibid.*, p. 243.

<sup>18</sup> Bachelard, G., *L'activité rationaliste*, *op. cit.*, p. 25.

<sup>19</sup> Bachelard, G., *L'activité rationaliste*, *op. cit.*, p. 25.

<sup>20</sup> Bachelard, G., *Essai*, *op. cit.*, p. 270.

<sup>21</sup> Bachelard, G., *Le rationalisme appliqué*, Paris, P.U.F., 1966, p. 57.

d'obtenir des informations directes sur les atomes individuels, mais il nous a même montré que les atomes eux-mêmes sont composés de corpuscules encore plus petits, qui peuvent être isolés et dont les propriétés peuvent être étudiées séparément.<sup>22</sup>

Avec la quantification de l'atome, les recherches contemporaines s'écartent des connaissances communes et réalistes présentes dans les investigations atomistiques précédentes. Il faut préciser que Bohr résout le problème de la stabilité de la matière au prix d'une contradiction interne de son modèle, à savoir, la discontinuité des trajectoires. Bachelard cherche à expliquer celle-ci en soulevant l'enjeu de l'homogénéité de l'espace. D'après lui, Bohr a établi une rupture avec les notions simples de trajectoires qui étaient basées sur une géométrie simple (euclidienne). L'idée de « saut » est en contradiction avec la notion commune d'espace pensée à partir de l'idée d'homogénéité.

David Velanes

L'intuition immédiate veut toujours qu'un trajet continu réunisse les trajectoires séparées. De ce trajet continu, la méthode de Bohr ne s'occupe nullement. Elle ne met vraiment en œuvre que les trajectoires distinguées *a priori*. Dans cette méthode, on contredit donc l'intuition la plus simple et la plus fondamentale, l'intuition de l'homogénéité de l'espace.<sup>23</sup>

Les recherches de Bohr ont contribué à une nouvelle notion d'espace, les *espaces abstraits*<sup>24</sup> où sont pensés les phénomènes subatomiques. Les *espaces abstraits* jouent un rôle important dans la compréhension contemporaine de la matière, puisqu'ils éliminent clairement les valeurs substantielles. Bachelard explique qu'ils sont construits de manière rationnelle. En tant qu'espaces conceptuels, il n'est pas possible de les trouver dans l'intuition immédiate. D'ailleurs, leur fonction physique est de permettre la réalisation d'une idée par l'expérience créant ainsi des nouvelles matières. « Un espace abstrait est une hypothèse plausible pour organiser une expérience. C'est une tentation rationnelle d'expérimenter »<sup>25</sup>.

Avec l'*acte épistémologique* établi par le modèle atomique quantifié, on est aussi face à une rupture avec les images pittoresques sur les atomes, puisque l'atomistique est pensée via des schémas mathématiques. L'image planétaire de l'atome de Bohr « [...] est – dans la pensée scientifique, sinon dans quelques pauvres et néfastes valorisations d'une philosophie de vulgarisation – un pur schème synthétique de pensées mathématiques. Dans l'atome planétaire de Bohr, le petit soleil central *n'est pas chaud* »<sup>26</sup>.

Dans la mécanique quantique, la notion d'atome acquiert un nouveau sens. Il est divisible en particules plus petites. C'est le comportement de ces particules élémentaires, à travers les relations de probabilités, qui permet désormais de mieux comprendre la nature de la matière.

<sup>22</sup> Bohr, N., *Atomic physics and human knowledge*, New York, John Wiley & Sons, 1958, p.24.

<sup>23</sup> Bachelard, G., *Les Intuitions*, op. cit., p. 150.

<sup>24</sup> Cf. Bachelard, G., *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine*, Librairie Félix Alcan, 1937, p. 120-140.

<sup>25</sup> *Ibidem* p. 124.

<sup>26</sup> Bachelard, G., *La poétique de l'espace*, Paris, P.U.F., 1961, p. 144.

### 3. Le modèle atomique de Bohr comme *obstacle épistémologique*

Si d'une part, en 1913, le modèle atomique planétaire de Bohr a établi un *acte épistémologique* faisant progresser scientifiquement les idées sur les atomes, ce modèle posera, d'autre part, certains problèmes dans la compréhension du concept contemporain de la matière. Heisenberg est clair à propos de la nouvelle conception de matière présentée par la mécanique quantique au cours du siècle dernier. Il écrit que :

[...] les expériences ont en même temps montré que ces particules peuvent se créer à partir d'autres particules, ou tout simplement à partir de l'énergie cinétique de particules, et qu'elles peuvent de nouveau se désintégrer en d'autres particules. En fait, ces expériences ont prouvé la complète mutabilité de la matière. A des énergies suffisamment élevées, toutes les particules élémentaires peuvent se muter en d'autres particules ; ou bien elles peuvent se créer à partir d'énergie cinétique et s'annihiler pour donner de l'énergie, par exemple du rayonnement. Par conséquent, nous avons là la démonstration finale de l'unité de la matière. Toutes les particules élémentaires sont faites d'une même substance, que nous pouvons appeler énergie ou matière universelle ; elles ne sont que des formes différentes sous lesquelles peut apparaître la matière.<sup>27</sup>

Bachelard, qui démontre l'historicité des concepts scientifiques et la nécessité de la *réurrence historique*, c'est-à-dire l'importance de juger les idées du passé à la lumière du présent<sup>28</sup>, a brièvement critiqué l'image du modèle atomique de Bohr. Selon le philosophe français, c'est une image dépassée que les philosophes et les physiciens doivent mettre à distance. Nous souhaitons maintenant contribuer à cette critique bachelardienne et l'appuyer.

Dans *La philosophie du non* (1940), Bachelard cite les considérations d'Eddington, qui soulignent la nécessité d'une analyse discursive et d'une position de précaution concernant les compréhensions offertes par le modèle atomique planétaire du physicien danois. Citons longuement Bachelard :

Après avoir rappelé le schéma proposé par Bohr qui assimilait le système atomique à un système planétaire en miniature, Eddington prévient qu'on ne doit pas prendre cette description trop à la lettre : « Les orbites peuvent difficilement se rapporter à un mouvement réel dans l'espace, car on admet généralement que la notion ordinaire d'espace cesse de s'appliquer à l'intérieur de l'atome ; et l'on n'a pas non plus, de nos jours, le moindre désir d'insister sur le caractère de soudaineté ou de discontinuité qu'implique le mot *saut*. On constate également que l'électron ne peut pas être localisé de la manière qu'entraînerait cette image. En résumé, le physicien dresse un plan soigné de l'atome, puis le jeu de son esprit critique le conduit à supprimer l'un après l'autre chaque détail. Ce qui subsiste est l'atonie de la physique moderne ! » Nous exprimerions les mêmes pensées autrement. Il ne nous semble pas, en effet, qu'on puisse comprendre l'atome de la physique moderne sans évoquer l'histoire de son imagerie, sans reprendre les formes réalistes et les formes rationnelles, sans en expliciter le profil épistémologique.<sup>29</sup>

<sup>27</sup> Heisenberg, W., *Physique et philosophie*, op. cit., p. 209-210.

<sup>28</sup> Bachelard, G., *L'engagement*, op. cit., p. 154.

<sup>29</sup> Bachelard, G., *La philosophie du non. Essai d'une philosophie du nouvel esprit scientifique*, P.U.F., 1983, p. 138-139.

Dans l'optique de clarifier la critique bachelardienne du modèle de Bohr, David Velanes écrit que, en ce qui concerne l'analogie établie par rapport au système solaire en miniature, bien que Bohr « [...] ait institué une mise à jour conceptuelle, il a, comme le physicien néo-zélandais [Rutherford], utilisé une analogie par laquelle il a conçu le modèle nucléaire de l'atome comme un système solaire miniature »<sup>30</sup>. Vincent Bontems donne également une explication pertinente. Il écrit que :

David Velanes

La composante analogique du modèle de l'atome de Bohr, qui avait été indispensable lors de sa formulation, est devenue entre-temps une métaphore superflue, un obstacle : car il n'y a plus de sens à parler de « trajectoire » dans une physique atomique qui s'élabore désormais en rupture avec les intuitions ordinaires de l'espace. L'analogie initiale ayant été abandonnée, Bachelard adopte sur elle un point de vue récurrent et la considère comme périmée. Pour autant, l'image de Bohr ne représente pas le même type d'obstacle que les images littéraires, car elle peut être « purifiée », alors que les images du XVII<sup>e</sup> siècle doivent être refoulées.<sup>31</sup>

Dans *La formation de l'esprit scientifique* (1938), Bachelard fait une grande critique des analogies, métaphores et images, car elles peuvent constituer des *obstacles épistémologiques* et donc faire perdre au savoir scientifique son « vecteur d'abstraction<sup>32</sup>. » Il est catégorique quand il affirme que « [...] une science qui accepte les images est, plus que toute autre, victime des métaphores. Aussi l'esprit scientifique doit-il sans cesse lutter contre les images, contre les analogies, contre les métaphores<sup>33</sup>. »

La notion bachelardienne d'*obstacle épistémologique* fait référence aux idées qui peuvent entraver ou même ralentir le progrès des connaissances scientifiques. C'est « [...] en termes d'obstacles qu'il faut poser le problème de la connaissance scientifique »<sup>34</sup>. Sur la même page où figure cette citation, Bachelard poursuit en expliquant que ces obstacles ne sont pas des éléments extérieurs « [...] comme la complexité et la fugacité des phénomènes, ni d'incriminer la faiblesse des sens et de l'esprit humain »<sup>35</sup>, mais d'éléments qui apparaissent dans l'acte de construction de la connaissance, « [...] par une sorte de nécessité fonctionnelle, des lenteurs et des troubles »<sup>36</sup>.

Le concept d'*obstacle épistémologique* est solidaire de l'idée d'habitudes intellectuelles construites par la force de l'histoire. Les idées peuvent se cristalliser dans les discours scientifiques et entraver leur progression. « Une connaissance acquise par un effort scientifique peut-elle même décliner. La question abstraite et franche s'use : la réponse concrète reste. Dès lors, l'activité spi-

<sup>30</sup> Velanes, D., « *Bachelard crítico de Bohr?* », in Rocha, G. K. da. (ed.), *Bachelard, um livro vivo (Homenagem aos 135 anos de nascimento do Filósofo)*, Goiânia, Editora Phillos, 2019, pp. 181.

<sup>31</sup> Bontems, V., *Bachelard*, 2010, Paris, Les Belles Lettres, 2010, p. 46

<sup>32</sup> Cf. Bachelard, G., *La formation*, op. cit., p.15.

<sup>33</sup> Bachelard, G., *La formation*, op. cit., p. 38.

<sup>34</sup> Bachelard, G., *La formation*, op. cit., p. 13.

<sup>35</sup> *Ibidem*.

<sup>36</sup> *Ibidem*, p. 13.



rituelle s'invertit et se bloque »<sup>37</sup>. À la page suivante, l'auteur explique que : « Des habitudes intellectuelles qui furent utiles et saines peuvent, à la longue, entraver la recherche »<sup>38</sup>.

Il est vrai que dans l'esprit scientifique, certains obstacles peuvent disparaître dans l'acte même du développement de la connaissance, mais il est également vrai qu'il y a ceux qui « [...] sont formés pas les schèmes de la science sédimentés sous forme d'évidences, qui font obstacle au progrès de la science quand une nouvelle rupture s'impose pour réinventer les schèmes appliqués au réel »<sup>39</sup>. Donc, il faut travailler la pensée discursive qui institue dans la culture scientifique l'activité rectificatrice des idées sédimentées. Cette activité crée les conditions d'une *psychanalyse de la connaissance objective*<sup>40</sup> dont l'une des fonctions est de rejeter les images, analogies et métaphores, généralement imprégnées de valeurs subjectives, qui sont liées aux idées qui se veulent objectives.

Les analogies, les métaphores et les images, en tant qu'éléments qui caractérisent le savoir commun, corrompent la connaissance scientifique lorsqu'ils sont incorporés au discours rationnel. Les sciences contemporaines ont rompu avec le sens commun dans la mesure où elles ont établi la pensée mathématique comme base de l'expérience. On peut le constater, par exemple, en analysant la géométrie non euclidienne de Bolyai, ainsi que celle de Lobachevsky. Contrairement aux notions simples présentées par la géométrie d'Euclide, les concepts de ces géométries n'établissent pas d'analogies avec la réalité ordinaire<sup>41</sup>. Dans le nouvel esprit scientifique, la connaissance part du rationnel pour aller vers le réel, ce qui signifie une inversion épistémologique dans l'histoire du savoir scientifique<sup>42</sup>. Dans le nouvel esprit scientifique, la connaissance part du rationnel pour aller vers le réel<sup>43</sup>.

Dans cette inversion épistémologique, les analogies et les images ne peuvent pas illustrer les idées des nouvelles sciences. Selon Bachelard, elles ne contribuent pas à la recherche scientifique. En fait, il considère qu'elles conduisent à de grands malentendus intellectuels, « [...] elles entraînent à des *fuites* de pensée ; elles empêchent cette *curiosité homogène* qui donne la patience de suivre un ordre de faits bien défini »<sup>44</sup>.

On peut affirmer que l'analogie de l'atome de Bohr conduit à une image qui est circonscrite par des relations géométriques simples et bien définies. Cette image de l'atome est solidaire de l'intuition réaliste et suggère une conception matérialiste erronée des phénomènes atomiques. Ainsi, le modèle atomique planétaire favorise une compréhension de la notion de matière beaucoup plus proche du sens commun que de la science atomique qui a commencé au XX<sup>e</sup> siècle. Cette science qui s'est développée jusqu'à aujourd'hui a un fondement éminemment théorico-mathématique.

<sup>37</sup> *Ibidem*, p. 14.

<sup>38</sup> *Ibidem*, p. 15.

<sup>39</sup> Rode, C. – Bontems, V., « La notion d'entité en tant qu'obstacle épistémologique. Bachelard, la mécanique quantique et la logique », in *Bulletin Gaston Bachelard*, 2011, n. 13, p. 14.

<sup>40</sup> Cf. Bachelard, G., *La formation*, *op. cit.*

<sup>41</sup> Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, 1999, p. 28-29.

<sup>42</sup> *Ibid.*, p. 8.

<sup>43</sup> *Ibidem*, p. 8.

<sup>44</sup> Bachelard, G., *La formation*, *op. cit.*, p. 88.

Les dessins d'atomes reproduits dans les manuels scolaires, comme dans les ouvrages de vulgarisation scientifique, peuvent donc être présentés comme des obstacles, car non seulement ils favorisent une compréhension réaliste des corpuscules quantiques, mais ils sont aussi en contradiction avec leur propre définition conceptuelle. À cet égard, Michelle Pichon apporte une contribution importante en soulignant que :

Les ouvrages de vulgarisation scientifique sont souvent remplis d'images destinées à illustrer et éclaircir des idées abstraites. Il n'y a rien de répréhensible dans cette pratique qui vient en aide à la raison. Une certaine vigilance s'impose néanmoins tant l'image a le pouvoir de séduire la raison. Entre exprimer et expliquer, le pas peut être aisément franchi par le lecteur peu averti. C'est précisément le propre de l'esprit préscientifique d'utiliser d'images comme de principes explicatifs. Il s'agit là d'un obstacle épistémologique.<sup>45</sup>

Ainsi, en ce qui concerne l'aspect pédagogique du modèle Bohr, sur la base des considérations ci-dessus, nous pouvons affirmer qu'il se présente également comme un *obstacle pédagogique*<sup>46</sup>. « Le modèle de Bohr, pour beaucoup d'étudiants, est encore la porte d'entrée vers le monde fascinant de la structure de la matière »<sup>47</sup>. Face à de tels constats, les leçons de Bachelard se révèlent d'actualité.

Dans *Sous l'atome, les particules* (1993), Étienne Klein apporte des considérations qui contribuent à notre analyse. L'auteur écrit que les particules par lesquelles nous étudions la matière en physique quantique n'ont pas de relations avec les « boules par lesquelles elles sont souvent représentées »<sup>48</sup>. Ils sont étudiés par la théorie quantique des champs, par des espaces abstraits, comme l'explique Bachelard dans son ouvrage *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine* (1937)<sup>49</sup>.

Dans cet ouvrage de 1937, le philosophe de Bar-sur-Aube affirme le caractère novateur et créatif de la raison humaine qui instruit la nouvelle physique lorsqu'il écrit que « [...] l'*homo faber* est libéré de l'espace intuitif où s'acharnaient ses premiers gestes. Guidé par le nouvel esprit scientifique, soutenu par l'abstraction rationnelle, l'homme de pensée l'apprête à tout fabriquer, même l'espace »<sup>50</sup>. Klein ajoute: « un champ quantique est un objet mathématique qui a dû être inventé pour décrire les particules »<sup>51</sup>.

Dans *L'activité rationaliste de la physique contemporaine* (1951), Bachelard explique que les particules n'ont pas les mêmes caractéristiques que les objets communs et les appelle des *non-choses*, résultat d'une activité *phénoménotechnique*<sup>52</sup>

<sup>45</sup> Pichon, M., « L'inconscient de l'esprit scientifique. Rêverie savante et rêves des savants », in *Bulletin Gaston Bachelard*, 2007, n° 7, p. 8-9.

<sup>46</sup> Cf. Bachelard, G., *La formation*, op. cit., p. 18-19.

<sup>47</sup> Parente, F. A. G., (et al), « Os 100 anos do átomo de Bohr », *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2013, n° 4, p. 1.

<sup>48</sup> Klein, É., *Sous l'atome, les particules*, Paris, Flammarion, 1993, p. 21.

<sup>49</sup> Cf. Bachelard, G., *L'expérience de l'espace*, op. cit., 120-140.

<sup>50</sup> Bachelard, G., *L'expérience de l'espace*, op. cit., p. 140.

<sup>51</sup> Klein, É., *Sous l'atome*, op. cit., p. 22.

<sup>52</sup> Bachelard, G., *Les intuitions*, op. cit., p. 142 : « Dans la phénoménotechnique, aucun phénomène n'apparaît *naturellement*, aucun phénomène n'est de premier aspect, aucun n'est *donné*. Il faut le *constituer* et en lire les caractères *indirectement*, avec une conscience toujours

dans laquelle la raison et l'expérience sont imbriquées dans une relation créative. Il explique en six déclarations la nature particulière de ces éléments par lesquels la physique contemporaine cherche à comprendre la réalité matérielle : (1) « *le corpuscule n'est pas un petit corps. Le corpuscule n'est pas un fragment de substance* »<sup>53</sup> ; (2) « *le corpuscule n'a pas de dimensions absolues assignables* »<sup>54</sup> ; (3) « *on ne leur attribue pas plus d'un ordre de grandeur* »<sup>55</sup> ; (4) « [...] *corrélativement, [aux thèses précédentes] si le corpuscule n'a pas de dimensions assignables, il n'a pas de forme assignable* »<sup>56</sup> ; (5) « *puisque on ne peut attribuer une forme déterminée au corpuscule, on ne peut pas davantage lui attribuer une place très précise* »<sup>57</sup> et enfin, (6) « *le corpuscule peut s'annihiler* »<sup>58</sup>.

Par conséquent, nous pouvons affirmer, comme Klein, que les particules ne peuvent pas être dessinées. Et l'auteur écrit que nous devons nous habituer « [...] tout comme les physiciens, à l'impuissance de l'image. En fait, notre besoin de voir, aussi irrépressible soit-il, est ici irrémédiablement frustré : on ne peut pas représenter visuellement une particule<sup>59</sup>. » Cela signifie que la compréhension commune de la matière enracinée dans notre culture doit être modifiée.

Sur la base de ces considérations, nous pouvons dire que l'analogie de l'atome comme système solaire miniature établie par Rutherford dans son modèle atomique, et poursuivie par Bohr à travers la quantification de ce modèle, s'avère dangereuse pour la connaissance scientifique. On peut la considérer comme un *obstacle épistémologique*, non seulement parce qu'elle établit un rapport direct avec des images liées à une métaphysique réaliste assez simpliste, mais aussi parce que cette image a été ancrée dans l'imaginaire populaire à travers des livres, des revues et des sites d'informations par lesquels ils renforcent une habitude intellectuelle, c'est-à-dire une façon intuitive de penser l'atome de façon éminemment matérialiste. En ce sens, ils apparaissent comme des obstacles à la compréhension de la notion de matière dans la pensée scientifique contemporaine qui est conceptualisée comme énergie.

#### 4. Considérations finales

Depuis la révolution de la physique contemporaine, dans laquelle les contributions de Bohr ont été essentielles, le matérialisme ne peut plus être pensé au moyen d'une simple philosophie, comme l'écrit Bachelard dans *Le matérialisme rationnel* (1953) :

éveillée de l'interprétation instrumentale et théorique, sans que jamais l'esprit ne se divise en pensée expérimentale pure et théorie pure ».

<sup>53</sup> Bachelard, G., *L'activité rationaliste*, op. cit., p. 76.

<sup>54</sup> *Ibidem*, p. 77.

<sup>55</sup> *Ibidem*, p. 78-79.

<sup>56</sup> *Ibidem*, p. 79.

<sup>57</sup> *Ibidem*, p. 81.

<sup>58</sup> *Ibidem*, p. 82.

<sup>59</sup> Klein, É., *Sous l'atome*, op. cit., p. 23-24.

Dès qu'on suit l'évolution des connaissances scientifiques sur la matière dans la période contemporaine, on est amené à s'étonner que le matérialisme puisse encore être tenu, par les philosophes, comme une philosophie simple, voire comme une philosophie simpliste. En effet, les problèmes envisagés par les sciences de la matière se multiplient actuellement et se diversifient avec une telle rapidité que le matérialisme scientifique – si seulement on le suit dans le détail de ses pensées effectives – est en passe de devenir la philosophie la plus complexe et la plus variable qui soit.<sup>60</sup>

David Velanes

Un des points fondamentaux soulevés dans l'épistémologie de Bachelard à propos de la conception contemporaine de la matière concerne une nouvelle base épistémologique introduite par les sciences physico-chimiques. Selon lui, il faut désormais penser dans le cadre du *matérialisme instruit, ordonné* en rupture avec le *matérialisme naïf*. Ce nouveau matérialisme a le pouvoir de créer des nouvelles matières à partir de l'activité rationnelle, « [...] sa rationalité est précisément productrice de découvertes »<sup>61</sup>. Le modèle atomique de Bohr, en tant qu'*acte épistémologique*, a ouvert la voie à cette nouvelle époque du matérialisme.

Dans *Le rationalisme appliqué* (1949), Bachelard explique que ce matérialisme est fondé sur les instruments techniques de mesure qui organisent l'expérience. Il s'agit d'un matérialisme technique qui a « [...] précisément pour fonction de juguler tout ce qui pourrait être qualifié d'irrationnel dans ses matières »<sup>62</sup>. Il convient de noter que ces instruments sont des produits de théories, ils sont des « théories matérialisées »<sup>63</sup> dont la fonction est de concrétiser les objets de la pensée, les *noumènes scientifiques*<sup>64</sup>. Comme l'explique bien Dominique Lecourt, dans la conception de matérialisme technique de Bachelard, l'activité rationnelle « [...] consiste par le biais de mises au point d'instruments théoriquement définis et par celui de montages d'appareils suivants des programmes de réalisation rationnelle à effectuer des *couplages* entre l'abstrait et le concret »<sup>65</sup>. Ainsi, le matérialisme technique « [...] correspond essentiellement à une réalité transformée, à une réalité rectifiée, à une réalité qui précisément a reçu la marque humaine par excellence, la marque du rationalisme »<sup>66</sup>.

La conception contemporaine de la matière, comme nous l'avons indiqué précédemment en décrivant la nature des particules élémentaires, ne peut être négligée. Bachelard critique les philosophes de son temps qui ont adopté une position réaliste ou idéaliste sur la matière. Encore aujourd'hui, il ne serait pas surprenant d'entendre un philosophe dire que l'atome est une *chose* matérielle, un point matériel que nous ne pouvons tout simplement pas connaître en raison de la fragilité de notre perception. C'est une vision qui met à l'arrière-plan les principes des

<sup>60</sup> Bachelard, G., *Le matérialisme rationnel*, Paris, P.U.F., 1972, p. 1.

<sup>61</sup> *Ibidem*, p. 7.

<sup>62</sup> Bachelard, G., *Le rationalisme appliqué*, *op. cit.*, p. 7.

<sup>63</sup> Cf. Bachelard, G., *Le nouvel*, *op. cit.*, p. 12.

<sup>64</sup> Bachelard, G., *L'activité rationaliste*, *op. cit.*, p. 7 : « Les noumènes de la pensée scientifique sont des outils de pensée pour la transformation des phénomènes. Ils n'ont plus rien des rapports avec une statique chose en soi. Ils s'éclairent dans la syntaxe des théories ».

<sup>65</sup> Lecourt, D., *L'épistémologie historique de Gaston Bachelard*, Paris, Vrin, 2002, p.70.

<sup>66</sup> Bachelard, G., *Le rationalisme appliqué*, *op. cit.*, p. 9.

philosophies traditionnelles concernant la conception de la matière. Ainsi, nous sommes d'accord avec Bachelard lorsqu'il déclare que « [...] souvent le matérialisme philosophique est purement et simplement plaqué sur ce matérialisme inné. Enraciné sur ce fond, le philosophe prétend souvent comprendre par continuité les expériences du matérialisme scientifique »<sup>67</sup>.

Nous soulignons dans cet article que le modèle atomique nucléaire de Bohr se révèle alors comme un paradoxe épistémologique. Ce paradoxe peut être bien compris par une analyse *historique-épistémologique*<sup>68</sup>, épistémologique-historique<sup>69</sup> ou *trans-historique*<sup>70</sup>. Au-delà d'une telle discussion terminologique, nous pouvons comprendre le sens de ce paradoxe dans la philosophie scientifique présentée dans les œuvres de Bachelard. En effet, c'est son analyse sur l'histoire du développement de la connaissance scientifique qui dévoile ce paradoxe comme un *acte épistémologique* et comme un *obstacle épistémologique*.

Il y a donc un pôle positif dans les études du physicien danois qui, à la lumière de la pensée de Bachelard, peut être considéré comme un *acte épistémologique*, car il fait progresser les connaissances sur la matière. Il est clair que Bohr a établi une rupture conceptuelle avec les idées non seulement des doctrines atomistes de l'histoire, mais aussi avec les idées de Rutherford. Cette compréhension nous met en opposition avec les auteurs qui utilisent l'expression *modèle atomique de Rutherford-Bohr* de manière générique, parce que dans leurs descriptions les détails, les précisions sont ignorées. Nous considérons que ce lien terminologique est symptomatique, il révèle un continuisme épistémologique. Et contre ce continuisme Bachelard écrit :

La pensée scientifique repose sur un passé réformé. Elle est essentiellement en état de révolution continuée. Elle vit actuellement d'axiomes et de techniques, c'est-à-dire de pensées vérifiées et d'expériences qui ont fait, dans une extrême précision, leurs preuves de validités. La science, dans ces conditions, n'a rien à gagner à ce qu'on lui propose de fausses continuités alors qu'il s'agit de franches dialectiques [...] Laisser supposer une telle filiation, c'est confondre les valeurs, c'est manquer précisément au devoir philosophique d'instituer les valeurs proprement scientifiques, en établissant ces valeurs dans leur autonomie.<sup>71</sup>

D'autre part, il existe également un pôle négatif dans les études de Bohr souligné par Bachelard dans son épistémologie, à savoir l'insuffisance du modèle atomique quantifié dans le mouvement constant de la raison. Cela nous semble opportun de le considérer comme un *obstacle épistémologique*. Ce modèle atomique a été supplanté par les études de Werner Heisenberg et Erwin Schrödinger. D'ailleurs, encore aujourd'hui il est aussi rectifié et remplacé par de nouveaux modèles plus élaborés<sup>72</sup>.

<sup>67</sup> Bachelard, G., *Le matérialisme*, op. cit., p. 21.

<sup>68</sup> Cf. Canguilhem, G., *Études d'histoire et de philosophie des sciences : concernant les vivants et la vie*, Paris, Vrin, 1994.

<sup>69</sup> Cf. Lecourt, D., *L'épistémologie historique*, op. cit., p. 9.

<sup>70</sup> Cf. Bontems, V., *Bachelard*, op. cit., 2010.

<sup>71</sup> Bachelard, G., *Le matérialisme*, op. cit., p. 103.

<sup>72</sup> Cf. Klein, É., *Sous l'atome*, op. cit., p. 39.

Bien que le modèle de Bohr ait constitué un pas important vers le modèle correct de la structure des atomes, il ne constitue pas la réponse définitive. En fait, le modèle présente des défauts majeurs, par exemple, il ne peut pas expliquer l'effet Zeeman anormal (qui implique le spin de l'électron) et le spectre de l'atome d'hélium (ortho-hélium et para-hélium). Le modèle de Bohr explique difficilement les spectres d'atomes plus complexes, bien qu'il réussisse à prédire certaines lignes s'il est complété par des règles empiriques supplémentaires. D'un point de vue théorique, il s'agit d'un hybride entre la physique classique et la physique quantique, pour certains un hybride insatisfaisant. L'atome de Bohr prévaut dans la période de 1913 à 1925. Vers 1925, et même avant, l'atome de Bohr est abandonné au profit de la nouvelle mécanique quantique de Heisenberg et Schrödinger.<sup>73</sup>

On peut ajouter, à la lumière de l'épistémologie bachelardienne, que l'analogie avec le système solaire en miniature ne semble pas être une source d'étude fiable pour comprendre la nature de la matière, puisqu'elle nous oriente vers une vision substantialiste des phénomènes atomiques. Comme l'écrit si bien Bachelard dans *Le matérialisme rationnel* (1953) :

Il faut arrêter net les comparaisons entre les impressions sensibles et les idées matérialistes. Toute comparaison est germe de mythologie. Elle tend à expliquer par les fausses lumières de la connaissance commune ce qui devrait être discursivement éclairci. Presque toujours la comparaison ramène l'esprit à la frontière de l'inconscient éphémère [...] il faut lutter contre la puissance des images matérielles.<sup>74</sup>

Dans cet article nous pensons avoir contribué à la compréhension des deux pôles, les deux sont importants pour les études sur la notion contemporaine de matière. Il est important également de mettre en évidence la positivité et la négativité du modèle atomique de Bohr dans l'épistémologie de Bachelard dans la perspective de prouver l'actualité de ses idées. Ce que nous appelons dans cet article le paradoxe épistémologique du modèle atomique de Bohr sert d'exemple des enseignements du philosophe de Bar-sur-Aube, notamment lorsqu'il écrit à propos du mouvement du savoir. « [...] On connaît contre une connaissance antérieure, en détruisant des connaissances mal faites, en surmontant ce qui, dans l'esprit même, fait obstacle à la spiritualisation »<sup>75</sup>.

David Velanes  
Universidade Federal de Bahia  
dvelanes@gmail.com

<sup>73</sup> Parente, F. A. G., (et al), « Os 100 anos do átomo de Bohr », *op. cit.*, p. 6.

<sup>74</sup> Bachelard, G., *Le matérialisme*, *op. cit.*, p. 29.

<sup>75</sup> Bachelard, G., *La formation*, *op. cit.*, p. 14.

## Bibliographie

- Bachelard, G., *Essai sur la connaissance approchée*, Paris, J. Vrin, 1969.
- Bachelard, G., *L'engagement rationaliste*, Paris, P.U.F., 1972.
- Bachelard, G., *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, J. Vrin, 1977.
- Bachelard, G., *La philosophie du non. Essai d'une philosophie du nouvel esprit scientifique*, P.U.F., 1983.
- Bachelard, G., *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, P.U.F., 1965.
- Bachelard, G., *Le matérialisme rationnel*. Paris, P.U.F., 1972.
- Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, P.U.F., 1999.
- Bachelard, G., *Le rationalisme appliqué*, Paris, P.U.F., 1966.
- Bachelard, G., *Les intuitions atomistiques*, Paris, J. Vrin, 1975.
- Bachelard, G., *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine*, Librairie Félix Alcan, 1937.
- Bohr, N., *Atomic physics and human knowledge*, New York, John Wiley & Sons, 1958.
- Bohr, N., *Sobre a constituição de átomos e moléculas*, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 2001.
- Bontems, V., *Bachelard*, Paris, Les Belles Lettres, 2010.
- Canguilhem, G., *Études d'histoire et de philosophie des sciences : concernant les vivants et la vie*, Paris, Vrin, 1994.
- Fiolhais, M – Ruivo, M. C., « O modelo atómico saturniano de Nagaoka », in *Gazeta de Física*, vol.19, 1996, p. 6-10. <https://www.spf.pt/magazines/GFIS/414/article/1277/pdf>, (dernière consultation 15.02.2021)
- Freire Junior, O. – Carvalho Neto, R., *O universo dos quanta: uma breve história da física moderna*, São Paulo, FTD, 1997.
- Heisenberg, W., *Physique et philosophie: la science moderne en révolution*, Paris, Albin Michel, 2018.
- Klein, É., *Sous l'atome, les particules*, Paris, Flammarion, 1993.
- Lecourt, D., *L'épistémologie historique de Gaston Bachelard*, Paris, Vrin, 2002.
- Luthy, C., « On Atomistic Intuitions and their Classifications », in *Kairos – Revista de Filosofia & Ciência*, 2012, n. 5, p. 155-167. <https://www.saavedrafajardo.org/Archivos/kairos59.pdf>, (dernière consultation 15.10.2020)
- Parente, F. A. G. (et al), « Os 100 anos do átomo de Bohr », in *Revista Brasileira de Ensino de Física*, n° 4, 2013, p. 4301-1 – 4301-8. <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/354301.pdf>, (dernière consultation 09.02.2021)
- Pessoa Junior, O., « Introdução histórica à Teoria Quântica », in *Cadernos de Física da UEFS*, n° 04, 2006, p.89-114. [http://opessoa.ufflch.usp.br/sites/opessoa.ufflch.usp.br/files/Artigo\\_OPessoa\\_Jr-UEFS.pdf](http://opessoa.ufflch.usp.br/sites/opessoa.ufflch.usp.br/files/Artigo_OPessoa_Jr-UEFS.pdf), (dernière consultation 01.11.2020)
- Pichon, M., « L'inconscient de l'esprit scientifique. Rêverie savante et rêves des savants », in *Bulletin Gaston Bachelard*, 2007, n° 7, p. 5-18.
- Planck, M., *Autobiografia científica e outros escritos*, tr. por. par E. dos Santos de Abreu, Rio de Janeiro, Contraponto, 2012, p. 130, (*Scientific autobiography and other papers*, London, Williams and Norgate, 1950).
- Rode, C. – Bontems, V., « La notion d'entité en tant qu'obstacle épistémologique. Bachelard, la mécanique quantique et la logique », in *Bulletin Gaston Bachelard*, 2011, n. 13, p. 12-38.
- Velanes, D., « *Bachelard crítico de Bohr?* » in G. K. da Rocha (dir). *Bachelard, um livro vivo (Homenagem aos 135 anos de nascimento do Filósofo)*, Goiânia, Editora Phillos, 2019.

