



HAL
open science

L'épistémologie mathématique de Gaston Bachelard

Sébastien Maronne, Frédéric Patras

► **To cite this version:**

Sébastien Maronne, Frédéric Patras. L'épistémologie mathématique de Gaston Bachelard. Bachelard Studies - Études bachelardiennes - Studi bachelardiani, 2022, 1-2, pp.51-68. 10.7413/2724-5470052 . hal-03670027

HAL Id: hal-03670027

<https://cnrs.hal.science/hal-03670027>

Submitted on 17 May 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'épistémologie mathématique de Gaston Bachelard

Sébastien MARONNE* et Frédéric PATRAS†

À paraître dans Charles Alunni (dir.),
« Gaston Bachelard et la philosophie des sciences aujourd'hui »,
Études Bachelardiennes, 01/2022

Cet article est dédié à Dominique LECOURT
qui a tant contribué aux études bachelardiennes.

Abstract

The crucial role which Bachelard attributed to mathematics within his historical epistemology to understand the “new scientific spirit” at work at the beginning of the 20th century is well known. Nonetheless, the application to mathematics of the classical Bachelardian epistemological categories (obstacle, rupture, sanctioned history and lapsed history), which were first conceived for physics or chemistry, raises several issues. In this article, we aim to study Bachelard’s mathematical epistemology for itself. We will first point out the natural connection between the issue of a Bachelardian mathematical epistemology and two classical topics, namely the relationship with Brunshvicg’s epistemology and the claim for discontinuity. In a second step, starting from the evolution of Bachelard’s thought towards a more committed rationalism, we will question what this evolution implies for mathematics by insisting on the notion of epistemological act sketched out by Bachelard. We will finally compare Bachelard’s and Cavallès’ mathematical epistemology.

Keywords: Bachelard; Brunshvicg; mathematical epistemology; epistemological rupture; epistemological act.

Table des matières

1	Introduction	2
2	Les mathématiques et la science	3
3	Bachelard et Brunshvicg	5

*Institut de Mathématiques de Toulouse, Université Paul Sabatier

†Laboratoire J.A. Dieudonné, Université Côte d’Azur et CNRS

4	Une rupture et une synthèse dans l'épistémologie bachelardienne	9
5	La notion d'acte épistémologique	12
6	Bachelard et Cavailles	13

1 Introduction

L'œuvre de Bachelard, sans cesse redécouverte et réinterprétée depuis sa création, joue aujourd'hui sur la scène épistémologique un rôle de référence, jusque dans les épistémologies de tradition analytique où la pertinence des idées de l'épistémologie historique, assez longtemps ignorée, est de mieux en mieux connue et revendiquée¹. Il n'en reste pas moins que « l'ensemble de l'œuvre de Bachelard (en particulier sa philosophie des sciences) est bien loin d'avoir épuisé toutes ses ressources : lire Bachelard, étude difficile, précise et rigoureuse, réclame maintes *relectures* » comme le souligne Charles Alunni (Alunni, 2018, p. 6). En effet, en dépit de la littérature abondante qui a été consacrée à l'épistémologie des sciences bachelardienne, beaucoup reste à dire, que ce soit pour en comprendre certains des ressorts ou, dans un souci de fidélité peut-être encore plus grand, pour essayer de la prolonger de façon synchronique en la mettant à l'épreuve de l'actualité des sciences.

C'est à cette double tâche que nous nous consacrerons ici dans le cas des mathématiques. Le rapport de Bachelard aux mathématiques a été traité au long au sein de l'historiographie ces dernières années² : nul ne peut en effet ignorer que les mathématiques jouent un rôle crucial dans l'épistémologie de la physique proposée par Bachelard. Néanmoins, en laissant de côté la physique mathématique, d'aucuns ont pu penser que Bachelard n'aurait eu qu'une connaissance et une approche somme toute superficielle du « développement de la pensée mathématique *elle-même* ». Charles Alunni a vigoureusement réfuté cette idée en s'attachant en particulier à rendre compte de la mobilisation de contenus mathématiques substantiels dans l'œuvre de Bachelard³.

Dans cette ligne, nous nous efforcerons de dévoiler l'épistémologie mathématique *pour elle-même* inhérente à l'œuvre de Bachelard. Bien entendu, il est difficile et quelque peu artificiel de dissocier ces deux aspects des mathématiques dans l'épistémologie bachelardienne, à savoir, d'un côté, leur inscription

1. Pour un panorama du bachelardisme contemporain, on pourra voir (Bontems, 2010, p. 202-210). Sur la réception contrastée de Bachelard dans l'épistémologie analytique de langue anglaise, au sein de laquelle l'ouvrage de Mary Tiles (Tiles, 1984) constitua naguère une exception, cf. (Bontems, 2010, p. 198-199) ainsi que Pravica (2019).

2. Il faut ici mentionner la somme que Charles Alunni a récemment consacrée à Gaston Bachelard et l'école surrationnaliste ainsi que le volume de la *Revue de synthèse* qu'il a dirigé : cf. Alunni (2018) et Alunni (2015). On y trouvera un riche ensemble d'analyses historiques et épistémologiques sur Bachelard et les mathématiques et un aperçu à peu près exhaustif de la bibliographie. On pourra aussi consulter (Martin, 2012, p. 19-50) sur le réalisme mathématique de Bachelard, Jean-Claude Pariente qui consacre une entrée aux mathématiques dans son *Vocabulaire de Bachelard* (Pariente, 2001, p. 22-26) ainsi que les deux articles classiques de Roger Martin et Maurice Loi : Martin (1974) et Loi (1984).

3. Cf. (Alunni, 2018, p. 125-138). Rappelons tout de même que le premier titre universitaire de Bachelard est une licence de mathématiques !

et leur rôle crucial dans l'épistémologie du nouvel esprit scientifique et, de l'autre, leur indépendance ou leur subordination vis à vis des catégories classiques (obstacle, rupture, histoire sanctionnée et histoire périmée) appliquées à la science. Il nous a tout de même semblé qu'il existait un champ de réflexion pour penser « le mathématique » pour lui-même dans une perspective bachelardienne, sujet au fond peu abordé dans l'historiographie.

2 Les mathématiques et la science

Expliquons-nous. Les mathématiques apparaissent paradoxalement à la fois omniprésentes et mises à part dans l'épistémologie bachelardienne. Tout est dit dans le premier chapitre de *La formation de l'esprit scientifique*, paru en 1938, dans lequel Bachelard introduit la notion d'obstacle épistémologique :

Après les obstacles que doit surmonter la connaissance empirique, nous en viendrons, dans l'avant-dernier chapitre, à montrer les difficultés de l'information géométrique et mathématique, les difficultés de fonder une Physique mathématique susceptible de provoquer des découvertes. Là encore, nous amasserons des exemples pris dans les systèmes maladroits, dans les géométrisations malheureuses. On verra comment la fausse rigueur bloque la pensée, comment un premier système mathématique empêche parfois la compréhension d'un système nouveau. Nous nous bornerons d'ailleurs à des remarques assez élémentaires pour laisser à notre livre son aspect facile. D'ailleurs pour achever notre tâche dans cette direction, il nous faudrait étudier, du même point de vue critique, la formation de l'esprit mathématique. Nous avons réservé cette tâche pour un autre ouvrage. À notre avis, cette division est possible parce que *la croissance de l'esprit mathématique est bien différente de la croissance de l'esprit scientifique dans son effort pour comprendre les phénomènes physiques. En fait, l'histoire des mathématiques est une merveille de régularité. Elle connaît des périodes d'arrêt. Elle ne connaît pas des périodes d'erreurs. Aucune des thèses que nous soutenons dans ce livre ne vise donc la connaissance mathématique. Elles ne traitent que de la connaissance du monde objectif.* (Bachelard, 1938a, Chap. I, La notion d'obstacle épistémologique, p. 22)

Si l'« information mathématique » est fondamentale dans les découvertes de la physique *mathématique*, toutefois la connaissance mathématique n'est pas visée, *en 1938*, par les thèses et les notions bachelardiennes, comme celle d'obstacle épistémologique, qui concernent la connaissance *objective*. Celle-ci fera l'objet d'un autre ouvrage mais lequel ? Les premiers commentateurs n'ont pas manqué d'insister sur le mathématisme bachelardien tout en notant que Bachelard n'avait pas consacré de livre aux mathématiques à proprement parler⁴. Maurice Loi cite ainsi Roger Martin qui écrit dans l'introduction de son article : « Pour Bachelard, la mathématique est la pensée rationnelle par

4. Le livre de Bachelard le plus mathématique, si l'on se restreint aux mathématiques « pures », est sa thèse principale parue en 1928, *l'Essai sur la connaissance approchée* : cf. (Bachelard, 1928a, Livre III, p. 169-242).

excellence *et* toute son œuvre démontre inlassablement que penser le réel, c'est le construire mathématiquement »⁵.

Un extrait de l'*Expérience de l'espace dans la physique contemporaine* paru deux années plus tôt en 1936 montre de manière éloquente en quoi consiste cette construction du réel accomplie par les mathématiques :

[...] l'information mathématique nous donne plus que le réel ; elle nous donne le plan du possible ; elle déborde l'expérience effective de la cohérence ; elle nous livre le compossible. Il ne s'agit pas d'une cohérence concrète, mais bien d'une cohérence abstraite. En fait, l'hamiltonien connu comme opérateur nous livrera, dans l'équation de Schrödinger, le spectre de toutes les valeurs possibles de l'énergie. La constante E qui, dans l'ancienne épistémologie réaliste, était considérée comme une donnée, comme une réalité empirique, est ici un paramètre qui doit se mettre en accord avec les conditions mathématiques incluses dans l'opérateur hamiltonien ; dès lors, une constante unique, attachée à une expérience unique, ne nous paraît donner qu'un prétexte pour la pensée inventive et productrice. *Guidés par l'information mathématique, nous pouvons espérer faire converger les probabilités et créer de toutes pièces des phénomènes dont la structure première peut, à bon droit, être qualifiée de mathématique.* (Bachelard, 1936a, Chap. IV, Les opérateurs mathématiques, p. 96-97)

Dans l'épistémologie symbolique de Bachelard, les mathématiques ne se contentent donc pas d'exprimer le réel mais le *pensent* et le *créent*. Dit autrement, les mathématiques ne sauraient se limiter à offrir un langage adéquat à la science, comme le prétendaient les logiciens du Cercle de Vienne⁶. Le réalisme mathématique, relationnel et axiomatique, proposé par Bachelard dans *Le nouvel esprit scientifique* illustre cette différence essentielle. Si d'une part, « le rôle des entités prime leur nature et que l'essence est contemporaine de la relation » (Bachelard, 1934, p. 22) et que « la mesure du réalisme mathématique se prend sur l'extension des notions plutôt que sur leur compréhension » (Bachelard, 1934, p. 28), la généralité de la ligne géodésique conférant à celle-ci davantage de réalité qu'à la ligne droite de l'intuition première, Bachelard tempère néanmoins cette axiomatique de conception hilbertienne par l'effort poétique des mathématiciens :

Qu'on parte donc du nominalisme hilbertien. Qu'on se soumette ensuite à un conventionnalisme absolu : toutes ces claires relations ne sont que des syllabes qui s'associent d'une manière strictement abracadabrante ! Mais voici alors l'effort poétique des mathématiciens, l'effort créateur, réalisateur : subitement, par une inflexion révélatrice, les syllabes associées forment un mot, un vrai mot, qui parle à la Raison et qui trouve, dans la Réalité, une chose à évoquer » (Bachelard, 1934, p. 35).

5. C'est nous qui soulignons. Cf. (Loi, 1984, p. 1) et (Martin, 1974, p. 46). Voir également (Lecourt, 1974, p. 83).

6. Cf. (Bachelard, 1936a, p. 89) ainsi que (Bachelard, 1934, p. 53). Sur ce thème classique, voir par exemple (Lecourt, 1969, p. 45-50).

Les mathématiciens ne construisent donc pas seulement le réel, les notions mathématiques qu'ils créent parlent à la raison. Comme le notait Roger Martin, la mathématique est la pensée rationnelle par excellence. Plus tard, dans les travaux d'après-guerre, par exemple dans l'*Activité rationaliste de la physique contemporaine* publiée en 1951, Bachelard insistera sur « le caractère philosophique nouveau de ce rationalisme et de ce réalisme associés, l'un et l'autre essentiellement actualisés dans des techniques formulées par des théories mathématiques » (Bachelard, 1951a, p. 2). Sa perspective aura alors changé : il ne s'agira plus pour lui d'analyser les obstacles qui entravent le progrès scientifique, comme dans la *Formation de l'Esprit Scientifique*, mais d'étudier au contraire les conditions épistémologiques d'un tel progrès. Nous y reviendrons dans la section 4, p. 9.

3 Bachelard et Brunschvicg

Les relations entre Bachelard et Brunschvicg, qui fut avec Abel Rey le directeur de thèse de Bachelard⁷, sont complexes et multiples. Les deux philosophes se citent mais aussi se commentent⁸. Nous nous concentrerons ici sur les mathématiques⁹ auxquelles Brunschvicg a consacré la somme des *Étapes de la philosophie mathématique* (Brunschvicg, 1912), et nous considérerons en particulier le problème épistémologique de la discontinuité en sciences auquel Brunschvicg et Bachelard paraissent avoir donné des réponses différentes.

L'épistémologie de Brunschvicg relève d'un « idéalisme critique » fondé sur un dialogue dynamique entre l'esprit et le réel, celui-là confrontant ses jugements au choc de l'expérience. Comme le rappelle François Dagognet :

On sait combien l'intelligence, pour Brunschvicg, se définit par son pouvoir de constituer la réalité et d'en épouser, par conséquent, les sinuosités : il ne désolidarise pas l'esprit inventif et la nature de plus en plus riche, c'est-à-dire rationnelle. Et l'irrationnel n'est que l'envers d'une définition trop restrictive de la raison : il ne signifie pas son échec, mais l'invite à se modifier ou à se libérer. (Dagognet, 1965, p. 189)

Le rationalisme de Brunschvicg, ouvert aux progrès de la science, est donc *évolutif* : il inscrit la pensée rationnelle dans une histoire qui connaît des « étapes » ou des « âges » (Brunschvicg, 1912, 1934). Non seulement ce modèle s'applique aux mathématiques, mais ce sont elles qui apportent leur positivité

7. La thèse principale *Essai sur la connaissance approchée* (Bachelard, 1928a) est dédiée à Abel Rey tandis que la thèse complémentaire *Étude sur l'évolution d'un problème de physique : la propagation thermique dans les solides* (Bachelard, 1928b) est dédiée à Léon Brunschvicg, en « hommage respectueux ».

8. Voir par exemple, la longue recension des deux thèses de Bachelard par Brunschvicg dans la *Revue Philosophique de la France et de l'Étranger* (Brunschvicg, 1929). En 1945, Bachelard publiera dans la *Revue de métaphysique et de morale* un article sur la « la philosophie scientifique » de son maître, mort l'année précédente. Cf. Bachelard (1945).

9. Pour une comparaison plus étendue, nous renvoyons au bel article de François Dagognet (Dagognet, 1965). Sur Brunschvicg, on pourra consulter la monographie de René Boirel (Boirel, 1964, p. 42-65) et l'article d'Anastasios Brenner (Brenner, 2021). Enfin, pour une comparaison très éclairante entre Brunschvicg et Cavailles, voir l'article d'Alain Michel (Michel, 2020) qui évoque aussi Bachelard.

aux sciences, comme l'écrit Brunshvicg dans *L'orientation du rationalisme*, long article paru en 1920 dans la *Revue de métaphysique et de morale* :

Or le point central de nos efforts, dans les *Étapes de la philosophie mathématique*, a été d'établir que la question du rapport entre l'intelligible et le réel est susceptible de recevoir une solution positive sur le terrain même, de la mathématique. [...] « Les sciences dites positives doivent à la mathématique leur positivité, non seulement parce qu'il n'y a de relation précise, par suite de certitude proprement dite, que là où l'on introduit l'exactitude de la mesure, mais parce que la mathématique, ayant le privilège de considérer l'expérience dans les conditions où elle est à la fois plus simple et plus détachée du sensible, fournit le modèle de cette connexion entre l'activité de l'intelligence et l'épreuve des faits, qui constitue la vérité scientifique. »¹⁰ (Brunshvicg, 1920, p. 70-71)¹¹

Cette expérience purement intellectuelle, qui se déploie en mathématiques, est également évoquée dans les dernières pages de *L'expérience humaine et la causalité physique* (1922). Brunshvicg situe le traitement des « résistances » auxquelles est confrontée la physique au niveau des mathématiques :

Il existe une seconde sorte d'expérience, ou, si l'on préfère, une expérience du second degré, non plus *circonscrite*, mais *inscrite*, au cours de la pensée. Cette expérience apparaît à l'intérieur même de la sphère intellectuelle ; au cours de l'élaboration des relations abstraites, elle se traduit, en des points imprévisibles, par des résistances inattendues de la matière sur laquelle s'exerce le géomètre, l'analyste, l'algébriste, par des hiatus, par des impossibilités, [...] *des ruptures se sont produites*. Dans le calcul de l'hypoténuse du triangle rectangle, dans l'étude des équations algébriques, se sont manifestés des points d'arrêt brusque, qui au premier abord semblaient marquer un échec définitif, une limite infranchissable. L'irrationnel, le négatif, l'imaginaire, ont éclaté tout d'un coup à l'esprit. [...] Grâce à un mouvement ultérieur de la pensée, les points d'arrêt sont devenus des points de réflexion, d'où l'esprit est parvenu à créer des notions nouvelles qui ont été l'origine de nouvelles déductions. (Brunshvicg, 1922, p. 605)

Le matériau mathématique même, à travers les résistances qu'il offre, procure ainsi aux mathématiciens les moyens de les dépasser. En mathématiques, la résistance, l'obstacle créent les conditions (mathématiques, rationnelles, objectives) de leur dépassement et ce qui vaut pour les mathématiques vaut bien sûr pour la science. On trouverait bien d'autres textes aux résonances bachelardiennes chez Brunshvicg, comme par exemple celui-ci tiré d'un article de la *Revue de Métaphysique et de Morale* de 1906 intitulé « Sur l'implication et la dissociation des notions » :

Il y a dans l'histoire des sciences, il doit y avoir de même dans l'évolution de la philosophie, des ruptures définitives, des élimina-

10. Brunshvicg cite ici la communication rédigée pour le premier Congrès de philosophie mathématique d'avril 1914 et parue dans la *Revue de Métaphysique et de Morale* en 1916 (p. 341).

11. Ici et dans la suite, les références paginales aux articles de Brunshvicg renvoient aux textes édités dans les *Écrits philosophiques* (Brunshvicg, 1954).

tions décisives ; elles marquent les étapes du progrès ; elles ne permettent plus d'espérer une compensation, de maintenir un équilibre politique, de chercher un « juste milieu » entre l'erreur d'autrefois et la vérité d'aujourd'hui. (Brunschvicg, 1908, p. 25)

Les termes employés par Brunschvicg dans les textes précédents — en particulier celui de rupture — pourraient nous laisser accroire¹² que Brunschvicg pose, comme Bachelard après lui, la discontinuité dans les sciences à rebours de l'épistémologie positiviste héritée de Comte. Sur ce point, un riche et long échange entre Léon Brunschvicg et Gaston Milhaud, à l'occasion d'une séance de la Société française de Philosophie du 31 octobre 1912 consacrée à l'idée de la vérité mathématique (Brunschvicg, 1913), est particulièrement instructif. Brunschvicg, après avoir noté qu'« il semble à M. Milhaud qu'[il] a un peu trop séparé les « étapes », et substitué ainsi à la continuité effective de la pensée mathématique une discontinuité artificielle et en une certaine mesure arbitraire », répond sans équivoque en citant l'avant-propos des *Étapes de la philosophie mathématique* :

« La succession des systèmes métaphysiques qui ont fait dépendre la science tout entière des formes déterminées de l'intelligence, n'est que la moitié de l'histoire. L'autre moitié, c'est la croissance continue d'une pensée que sa richesse a fait toujours plus assurée d'elle-même. » J'ai donc tenu pour continu le développement de la pensée mathématique. [...] En fait, dans l'histoire telle qu'elle s'est produite, il y a eu à la fois *continuité pour la science*, *discontinuité pour la philosophie*. (Brunschvicg, 1913, p. 88-89)

La même scène se jouera le 25 mars 1950 lors d'une séance de la Société française de Philosophie consacrée à la nature du rationalisme. Maurice Fréchet y prend le rôle de Gaston Milhaud et Gaston Bachelard celui de Léon Brunschvicg. Tandis que le premier regrette que « ceux qui soutiennent certaines formes de la doctrine dialectique [...] donnent toujours l'impression que la science se manifeste par des destructions successives », Bachelard lui répond :

Vous voyez par conséquent que je suis tout à fait de votre avis sur les constitutions progressives et solides au point de vue historique des différentes étapes du rationalisme ; mais précisément ce sont des étapes. (Bachelard, 1950a, p. 82).

La rupture n'implique donc pas nécessairement la discontinuité. Bachelard reprend à son propre compte cette théorie des ruptures épistémologiques en refusant la thèse de la continuité en science. Il l'accepte toutefois pour les mathématiques, rejoignant ainsi Brunschvicg. Il écrit ainsi en 1928 dans l'*Essai sur la connaissance approchée* :

La science ne répond pas toujours aux questions laissées en suspens par les savants d'une époque précédente. Chaque temps a ses problèmes comme ses méthodes, sa propre manière de poser un inconnu devant son effort. [...]

12. Il y a quelque péril, dont nous sommes conscients, à tirer des conclusions à partir de citations isolées d'auteurs à l'œuvre abondante, comme Bachelard et Brunschvicg.

Ainsi, même dans l'évolution historique d'un problème particulier, on ne peut cacher de véritables ruptures, des mutations brusques, qui ruinent la thèse de la continuité épistémologique. (Bachelard, 1928a, Chap. XV, Continuité épistémologique et vérification progressive, p. 270)

Bachelard affirme en revanche dans la *Formation de l'esprit scientifique*, comme on l'a déjà vu, que l'histoire des mathématiques est une « merveille de régularité » qui connaît des « périodes d'arrêt » mais pas de « périodes d'erreur »¹³. Il continuera à soutenir cette thèse dans ses textes plus tardifs, comme *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine* paru en 1951, dans lequel il écrit que « l'histoire des sciences, dans sa dynamique dominante de *mathématisation progressive* est ainsi une vérité confirmée, redoublée, coordonnée » (Bachelard, 1951a, p. 29), ajoutant plus loin :

L'optique géométrique est une géométrie. Comme telle, elle a le bénéfice des progrès réguliers, le privilège des progrès sans régression, qui est le caractère historique singulier des mathématiques. Alors Newton *continue* Descartes et Euler *continue* Newton. » (Bachelard, 1951a, p. 40)

Continuité pour les mathématiques, discontinuité pour la science aurait pu écrire Bachelard en infléchissant la formule de son maître Brunschvicg. Les commentateurs ont pu voir dans cette différence de traitement un paradoxe et même une inconséquence (Lecourt, 1974, p. 110). Nous nous efforcerons de dissoudre cet apparent paradoxe dans la section 4 en nous appuyant sur les textes postérieurs à *La Philosophie du non*, parue en 1940, qui constitue un point de bascule dans l'épistémologie bachelardienne.

La différence sans doute la plus essentielle entre Bachelard et Brunschvicg regarde le rapport institué entre science et raison. Bachelard substitue à la raison évolutive de Brunschvicg, qui répondait à la raison immuable kantienne, la science évolutive, à laquelle celle-là doit obéir :

En somme la science instruit la raison. *La raison doit obéir à la science, à la science la plus évoluée, à la science évolutive.* [...] nous voulons simplement affirmer que l'arithmétique n'est pas plus que la géométrie une promotion naturelle d'une raison immuable. L'arithmétique n'est pas fondée sur la raison. C'est la doctrine de la raison qui est fondée sur l'arithmétique élémentaire. (Bachelard, 1940, p. 144).

En outre, comme le remarque Georges Canguilhem¹⁴ :

[E]n affirmant que la raison doit obéir à la science évolutive, Bachelard ne nous invite pas à parler d'une évolution de la raison. En effet, il est difficile de débarrasser de toute trace d'essentialisme un rationalisme évolutionniste. Dire que la raison évolue, c'est dire qu'on pourrait à la rigueur en concevoir des traits antérieurs à l'évolution, comme on dit du cœlacanthe qu'à la différence d'autres poissons il n'a pas évolué. (Canguilhem, 1975a, p. 200)

13. Cf. (Bachelard, 1938a, p. 22). Sur le rapport des mathématiques à l'erreur, voir aussi sa conférence « L'actualité de l'histoire des sciences » : (Bachelard, 1951b, p. 141) sur laquelle nous reviendrons.

14. Voir aussi (Lecourt, 1974, p. 41).

Ce renversement opéré par Bachelard conduit d'autre part à la constitution d'une pluralité de rationalismes régionaux et spécialisés, lesquels sont compris dans l'unité d'un rationalisme « intégrant », structural et apodictique, le rationalisme procuré par les mathématiques¹⁵, *a contrario* du rationalisme *général* de Brunschvicg. C'est une deuxième différence non moins essentielle.

Enfin, Bachelard insiste davantage que Brunschvicg sur « la forme polémique, sur l'allure dialectique du dépassement constitutif du savoir » (Canguilhem, 1957, p. 4), en particulier dans la *Formation de l'esprit scientifique* dans lequel il s'intéresse aux problèmes posés par l'*élimination* du réalisme initial en introduisant la notion d'obstacle épistémologique¹⁶. Bachelard écrit ainsi dans *La psychologie de la raison* parue en 1939 :

Je m'occupe présentement d'une psychanalyse de la connaissance rationnelle¹⁷. Je ne puis détacher mon esprit de la considération des obstacles épistémologiques qui s'opposent à une culture scientifique, que cette culture soit d'ordre expérimental ou d'ordre mathématique. *Je crois qu'on s'instruit contre quelque chose, peut-être même contre quelqu'un, et déjà contre soi-même. C'est ce qui donne, à mes yeux, tant d'importance à la raison polémique.* (Bachelard, 1939, p. 34)

Ce caractère d'opposition polémique sera quelque peu atténué — en dépit du titre — dans la *Philosophie du non* parue en 1940, qui fait écho aux analyses du *Nouvel esprit scientifique*¹⁸ et inaugure une seconde période de l'épistémologie bachelardienne, dans laquelle la psychanalyse de la connaissance rationnelle remplace la psychanalyse de la connaissance objective et la notion de dialectique se transforme¹⁹.

4 Une rupture et une synthèse dans l'épistémologie bachelardienne

François Dagognet, soulignant l'écart de neuf années qui sépare la publication de la *Philosophie du non* de celle, « en gerbe », entre 1949 et 1953, du *Rationalisme appliqué* (1951), de l'*Activité rationaliste de la physique contemporaine* et du *Matérialisme rationnel* (1953), va jusqu'à parler de « rupture épistémologique » dans l'épistémologie de Bachelard et remarque que « la première philosophie de la science amplifie toujours la note critique, rectificatrice ou polémique, alors que la seconde, à l'opposé, construit plus et livre davantage

15. Voir (Canguilhem, 1975a, p. 202-203) et le *Rationalisme appliqué* (Bachelard, 1949, p. 132-133).

16. Voir aussi, bien sûr, l'article paru dans la revue *Inquisition* consacré au surrationalisme en 1936 : Bachelard (1936b).

17. Ici Bachelard fait référence à *La philosophie du non* qui paraîtra en 1940.

18. Ainsi que le montre sans équivoque son sous-titre : « Essai d'une philosophie du nouvel esprit scientifique ».

19. Sur ce « thème épistémologique de prédilection » de Bachelard, nous renvoyons le lecteur à l'article de référence de Georges Canguilhem, « Dialectique et philosophie du non chez Gaston Bachelard » (Canguilhem, 1975a).

les assises, la variété ou la mobilité de l'infime. »²⁰

Jean-Claude Pariente souligne quant à lui dans sa belle étude sur le rationalisme bachelardien (Pariente, 2015) que « l'intérêt et l'objectif majeurs de *La Philosophie du non* [est] de prendre acte de cette évolution de la pensée de Bachelard » selon laquelle « le problème de l'accès à la science a perdu sa pertinence au profit de celui des progrès de la science » (Pariente, 2015, p. 248-249). Cette évolution de Bachelard est particulièrement visible dans le texte qui suit :

Notre conclusion est donc nette : *une philosophie des sciences, même si on la limite à l'examen d'une science particulière, est nécessairement une philosophie dispersée*²¹. Elle a cependant une cohésion, c'est celle de sa dialectique, c'est celle de son progrès. *Tout progrès de la philosophie des sciences se fait dans le sens d'un rationalisme croissant, en éliminant, à propos de toutes les notions, le réalisme initial.* Nous avons étudié les différents problèmes posés par cette élimination dans notre ouvrage sur *La Formation de l'esprit scientifique*. [...] *Nous allons, dans le présent livre, travailler à l'autre pôle, en essayant de montrer la rationalisation sous sa forme la plus subtile, quand elle tente de se compléter et de se dialectiser avec les formes actuelles du nouvel esprit scientifique.* (Bachelard, 1940, p. 50-51)

Pariente ajoute ensuite :

Ce qui [...] distingue irrémédiablement [les deux problèmes précédents], c'est que, au cours de la procédure d'accès à la science, l'état antérieur se voit définitivement dépassé et annulé, tandis que, au cours du progrès de la science, l'état antérieur est dépassé mais intégré. (Pariente, 2015, p. 249)

C'est ce que Bachelard nommait une induction transcendante dans le *Nouvel esprit scientifique* dans la mesure où la théorie précédente apparaît comme un *cas particulier* de la théorie nouvelle (Bachelard, 1934, p. 42), et qu'il nommera « généralisation dialectique » dans *La Philosophie du non* :

La négation doit rester en contact avec la formation première. Elle doit permettre une généralisation dialectique. *La généralisation par le non doit inclure ce qu'elle nie.* En fait, tout l'essor de la pensée scientifique depuis un siècle provient de telles généralisations dialectiques avec enveloppement de ce qu'on nie. Ainsi la géométrie non-euclidienne enveloppe la géométrie euclidienne ; la mécanique non-newtonienne enveloppe la mécanique newtonienne ; la mécanique ondulatoire enveloppe la mécanique relativiste (Bachelard, 1940, p. 137)

Alors que les mathématiques ne pouvaient faire figure que de glorieuse exception dans une épistémologie de l'erreur et de la discontinuité, elles deviennent un *modèle* dans une seconde épistémologie rationaliste du progrès et

20. Cf. (Dagognet, 1984, p. 152). Voir aussi (Canguilhem, 1975b, p. 203-204) : « Après *La Philosophie du non*, les études épistémologiques de Bachelard ne comportent plus de références à des philosophes de l'opposition. [...] Dans le devenir du savoir, c'est moins la rupture d'avec le moment antérieur qui est soulignée que la valorisation du moment postérieur ».

21. On retrouve ici la régionalisation de l'épistémologie.

de la généralisation dialectique. Bachelard écrit ainsi en 1951 dans sa célèbre conférence « L'actualité de l'histoire des sciences » :

Cette positivité absolue du progrès scientifique apparaîtra comme indéniable si nous examinons l'histoire d'une science modèle, l'histoire des mathématiques. Ici, il est bien évident qu'on ne peut décrire une décadence, car une diminution dans la cohérence des vérités serait tout de suite une erreur. Si l'histoire des sciences relatait des erreurs qui peuvent être faites après la découverte de la vérité mathématique, elle serait une histoire des mauvais élèves en mathématiques et non plus l'histoire des mathématiciens véritables. Une telle histoire quitterait le courant de l'histoire positive. (Bachelard, 1951b, p. 141)

Bachelard considère de fait un autre type d'erreurs en mathématiques et en sciences. L'« erreur euclidienne » n'est pas technique. En effet, la géométrie euclidienne demeure non seulement vraie mais constitue encore le canon de la mathématique axiomatique-déductive. L'erreur est « philosophique » :

L'état d'esprit strictement euclidien recélait une erreur philosophique essentielle. L'esprit préscientifique n'ayant pas vécu l'expérience de la mobilité essentielle des concepts élémentaires affirmait à la fois leur fixité et leur réalité. L'esprit préscientifique ne pouvait pas penser les concepts élémentaires formellement, puisque jamais il ne les dégageait totalement de leur contenu. (Bachelard, 1940, p. 133-134)

La citation qui suit tirée de *l'Activité rationaliste de la physique contemporaine* montrera enfin, tel un miroir, à quel point la rupture dans l'épistémologie bachelardienne s'accompagne dans le même temps d'une synthèse²² :

En somme, les mécaniques contemporaines : mécanique relativiste, mécanique quantique, mécanique ondulatoire sont des sciences sans aïeux. Nos arrière-neveux se désintéresseront sans doute de la science de nos arrière-grands-pères. Ils n'y verront qu'un musée de pensées devenues inactives, ou du moins de pensées qui ne peuvent plus valoir que comme prétexte de réforme d'instruction. [...] Une telle science [la science atomique moderne] n'a pas d'analogue dans le passé. Elle apporte un exemple particulièrement net de la rupture historique dans l'évolution des sciences modernes.

Et cependant, malgré son caractère révolutionnaire, malgré son caractère de rupture avec l'évolution historique régulière, une doctrine comme la mécanique ondulatoire est une synthèse historique parce que l'histoire arrêtée deux fois dans des pensées bien faites : les pensées newtoniennes et les pensées fresneliennes, reprend un nouveau départ et tend à une nouvelle esthétique des pensées scientifiques. (Bachelard, 1949, p. 23-24)

Rupture et synthèse, négation et intégration, à la fois, en mathématiques comme en sciences : voici que le paradoxe introduit auparavant est dissous !

22. Nous pensons ici comme François Dagognet que Bachelard a réalisé son programme de philosophie scientifique. Cf. (Dagognet, 1984, p. 148).

5 La notion d'acte épistémologique

La notion d'acte épistémologique, qui apparaît au détour d'une page dans l'*Activité rationaliste de la physique contemporaine* et disparaît aussitôt²³, paraît opérer une synthèse des différentes notions épistémologiques introduites auparavant par Bachelard dans le cadre d'une épistémologie du progrès scientifique. C'est sans doute pour cette raison que cette notion fugitive mais essentielle a retenu l'attention des commentateurs²⁴. Il n'en reste pas moins que la définition qu'en donne Bachelard pose davantage de questions qu'elle n'apporte de réponses :

Autrement dit, 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. On rencontre alors la dialectique des *obstacles épistémologiques* et des *actes épistémologiques*. Nous avons longuement étudié le concept d'obstacles épistémologiques dans un ouvrage antérieur. *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. Alors, il y a un négatif et un positif dans l'histoire de la pensée scientifique. Et ici le négatif et le positif se séparent si nettement que le savant qui prendrait parti pour le négatif se mettrait hors de la cité scientifique. Qui se bornerait à vivre dans la cohérence du système de Ptolémée ne serait plus qu'un historien. Et du point de vue de la science moderne, ce qui est négatif relève d'une psychanalyse de la connaissance ; il faut le barrer s'il tend à renaître. Au contraire ce qui dans le passé reste positif vient encore agir dans la pensée moderne. [...]*

On doit donc comprendre l'importance d'une dialectique historique propre à la pensée scientifique. En somme il faut sans cesse former et reformer *la dialectique d'histoire périmée et d'histoire sanctionnée* par la science actuellement active. (Bachelard, 1951a, p. 25)

Un acte épistémologique est donc selon Bachelard une saccade du génie scientifique qui apporte une impulsion *inattendue* dans le cours du développement scientifique, en opérant une séparation *nette et définitive* entre des contenus scientifiques positifs et des contenus négatifs, dont les premiers demeurent actifs dans le nouvel état de la science, ainsi produit, tandis que les seconds sont ou doivent être éliminés.

Les notions d'induction transcendante, de généralisation dialectique et de synthèse épistémologique²⁵ rencontrées auparavant dans le cas de la géométrie

23. À notre connaissance, il s'agit d'un *hapax*. On n'en retrouve pas trace dans les autres écrits de Bachelard.

24. Voir par exemple (Canguilhem, 1975b, p. 182-183), (Balibar, 1991, p. 12) et (Gayon, 2003, p. 98-101).

25. Nous écrivons à dessein 'synthèse épistémologique' au lieu de 'synthèse historique' qui est employé par Bachelard afin d'éviter toute confusion.

non-euclidienne et de la mécanique ondulatoire paraissent relever de la notion d'acte épistémologique sous son aspect positif. Toutefois, la définition de cette notion incorpore à nouveau un aspect négatif qui paraît faire écho à la notion d'obstacle épistémologique.

Tâchons de préciser en reprenant l'exemple de la géométrie non euclidienne étudiée par Bachelard dans le *Nouvel Esprit scientifique* et la *Philosophie du non*²⁶. Ici le négatif qui doit être abandonné concerne l'illusion de la fixité et de la réalité de concepts faussement élémentaires, tandis que le positif regarde l'approche relationnelle et axiomatique prônée par exemple dans les *Grundlagen der Geometrie* de Hilbert.

C'est l'occasion de rappeler un fait important : ce négatif ne relève pas d'une erreur technique (il n'est nullement question ici de critiquer les démonstrations fausses du postulat des parallèles), mais d'une erreur de méthode qui oblitère le progrès géométrique. La dialectique d'histoire sanctionnée et périmée s'applique ainsi aux mathématiques : qui se bornerait à vivre dans la géométrie d'Euclide en prétendant raisonner sur les droites et les cercles idéalisées à partir de l'intuition spatiale ne serait plus qu'un historien.

Affranchissons-nous à présent en partie du texte bachelardien, tout en cherchant à rester fidèle à la logique interne de sa pensée, afin de mettre à l'épreuve de l'actualité des savoirs mathématiques la notion d'acte épistémologique.

Tout acte mathématique, fût-il génial, n'est pas épistémologique. Il s'agit en effet de distinguer le progrès de la découverte de faits mathématiques nouveaux. C'est sans doute le fond de la polémique célèbre qui opposa Grothendieck à Deligne à propos des conjectures de Weil : dans la logique de la pensée grothendieckienne²⁷, résoudre une conjecture a en soi un intérêt limité et peut même être contre-productif lorsque la méthode utilisée, classique, stérilise le sujet et s'oppose à l'émergence d'une théorie nouvelle. L'avancée véritable est celle qui nous conduit à penser différemment la réalité mathématique. L'acte épistémologique se différencie ainsi par sa dimension intrinsèquement philosophique. Cette dimension, si elle n'est pas toujours thématiquement mise en avant par le mathématicien, doit l'être par l'épistémologue.

Nous proposerons pour conclure cette section une définition de l'acte épistémologique en substituant un point de vue normatif au point de vue phénoménologique bachelardien. Rappelons en effet que Bachelard se contente de décrire l'acte épistémologique comme saccade du génie scientifique. Par 'acte épistémologique', nous entendons tout acte qui remet en cause des principes logiques, ontologiques, ou sémantiques pour penser la nature des objets mathématiques au-delà des systèmes dans lesquels leurs définitions et leur étude se sont cristallisées. Nous entendons préciser et exploiter cette définition dans des travaux ultérieurs en l'appliquant à différents moments du développement mathématique.

6 Bachelard et Cavallès

La théorie bachelardienne de la généralisation dialectique, dont on observe les prémices dans le *Nouvel esprit scientifique* paru en 1934, et qui s'accomplit

26. Cf. (Bachelard, 1934, Chap. I, p. 19-40) et (Bachelard, 1940, p. 133).

27. Sur Grothendieck et Bachelard, voir (Patras, 2015, p. 79-83).

pleinement avec l'introduction de la notion d'acte épistémologique, ne laissa pas indifférents les représentants de « la jeune équipe » de la philosophie mathématique, Lautman et Cavaillès²⁸. L'existence de ces influences croisées et réciproques est documentée, et même revendiquée, quoique leur ampleur exacte reste aujourd'hui encore difficile à évaluer. Lautman cite ainsi le *Nouvel esprit scientifique* de Bachelard dans son compte rendu du Congrès International de philosophie des sciences tenu à Paris du 15 au 23 septembre 1935 à propos de la découverte de la mécanique nouvelle qui « correspond à une véritable “mutation” de l'esprit scientifique. » (Lautman, 2006, p. 59) et non à une simple généralisation par extension du connu à l'inconnu. Bachelard écrit un article sur l'œuvre de Jean Cavaillès publié en 1950 dans la biographie consacrée par Gabrielle Ferrières à Jean Cavaillès²⁹.

D'autre part, l'unité de base de l'épistémologie mathématique et scientifique de Bachelard est le concept plutôt que la théorie³⁰ et les concepts sont soumis à une dialectique créatrice comme chez Cavaillès³¹, même si, différence notable avec Cavaillès, l'acteur qui réalise les actes épistémologiques, le mathématicien, est bien présent :

Est-il meilleur exemple de cette dialectique enveloppante que l'extension du concept de parallèles quand on passe de la géométrie euclidienne à une géométrie non-euclidienne? On va alors d'une conceptualisation fermée, bloquée, linéaire à une conceptualisation ouverte, libre, arborescente.³² (Bachelard, 1940, p. 133)

On rencontre également chez Cavaillès de nombreuses formules bachelardiennes³³. Lorsqu'il revient sur le « triple rôle de la généralisation » dans *Méthode axiomatique et formalisme*, Cavaillès écrit ainsi :

Dans tous les cas la fécondité du travail effectif est obtenue par ces ruptures dans le tissu mathématique, ce passage dialectique d'une théorie portant en elle-même ses bornes à une théorie supérieure qui la méconnaît quoique et parce qu'elle en procède. (Cavaillès, 1938, p. 172)

Du reste, la thématization de Cavaillès n'est pas sans rapport avec l'induction transcendantale de Bachelard. Cavaillès écrit de la première que « la position du nouvel acte, *prolonge malgré la rupture les actes antérieurs, puisqu'il les englobe comme cas particulier* » (Cavaillès, 1946, p. 32).

28. Nous paraphrasons ici Bachelard qui écrit à Lautman le 11 janvier 1938 pour le remercier de l'envoi de ses thèses : « Avec quelle sympathie je salue en vous un représentant de la jeune équipe qui va ramener la philosophie aux tâches héroïques de la pensée difficile. [...] Dans la même estime, je tiens Cavaillès. Je n'ai pas encore de nouvelle de sa thèse. Il ne va pas tarder je pense à la soutenir. Si vous le voyez, faites-lui mes amitiés. » (Bachelard, 1938b, p. 129)

29. Cf. Bachelard (1950b) et (Ferrières, 1950, p. 221-234).

30. À ce sujet, voir par exemple les remarques éclairantes de Balibar dans (Balibar, 1991, n. 4, p. 12-13).

31. Sur la dialectique des concepts chez Cavaillès, nous renvoyons à l'étude classique d'Hourya Benis Sinaceur : (Benis Sinaceur, 2019, p. 159-176).

32. Voir aussi (Bachelard, 1949, p. 110) où Bachelard indique que « le noumène scientifique [et mathématique] n'est pas une simple essence, il est un progrès de pensée. »

33. Les convergences entre les deux épistémologues avaient été soulignées par Canguilhem : cf. par exemple (Canguilhem, 1977, p. 23-24).

Une dernière citation de Cavailles, tirée de *Transfinité et continu* paru en 1949, nous permettra de rendre cette convergence encore un peu plus évidente :

Le lien entre cette superposition intuitive et la dialectique du concept reste le problème fondamental de la philosophie mathématique. La description est bien connue de ces renversements historiques où le résultat fait éclater la méthode et le système tout entier dont il est issu : les procédés exigés par la solution d'un problème provoquent, dans l'actualisation même qui leur donne un sens, un tel changement d'éclairage qu'il faut déjà abandonner les notions qui forment leur structure. Mais les liaisons intellectuelles dépassent l'histoire empirique c'est leur développement dialectique qui assure à la fois le mouvement de celles-ci et par elles-mêmes la permanence de leur validité. Ce qui marque l'histoire est la soumission du transcendantal à ses étapes : l'obligation du passage est reconnue dans un échec, la nécessité du progrès dans l'indétermination d'une découverte. La nécessité apparaît après coup. Aucune analyse de la conscience des actes ne permet de prévoir, pas plus qu'elle ne procure une permanence quelconque. (Cavaillès, 1949, p. 273-274)

On aura reconnu dans ce texte tous les caractères d'un acte épistémologique. Quant à nous, nous n'avons guère de peine à nous persuader que « la description bien connue de ces renversements historiques où le résultat fait éclater la méthode et le système tout entier dont il est issu » renvoie sans doute à Brunschvicg mais plus encore à Bachelard.

Les « ratures » et « approfondissements »³⁴ conduisent ainsi à une révision permanente des mathématiques qui n'est pas négation mais enveloppement. Comme l'écrit Bachelard : « En lisant la thèse principale de Cavailles, on comprendra que le problème du fondement est inséparable de la création de nouveaux êtres mathématiques. Il faut fonder en créant et créer en fondant. » (Bachelard, 1950b, p. 183)

Références

Charles ALUNNI, éditeur. *Philosophie et mathématique. Bachelard et les mathématiques. Revue de synthèse*, Vol. 136, n° 1-2, p. 1-134, 2015. Avec des contributions de Ch. Alunni, M. Castellana, A. Cavazzini, R. Guitart et F. Patras.

Charles ALUNNI : *Spectres de Bachelard*. Hermann, Paris, 2018.

Gaston BACHELARD : *Essai sur la connaissance approchée*. Vrin, Paris, 1928a.

Gaston BACHELARD : *Étude sur l'évolution d'un problème de physique : la propagation thermique dans les solides*. Vrin, Paris, 1928b.

34. « L'un des problèmes essentiels de la doctrine de la science est que justement le progrès ne soit pas augmentation de volume par juxtaposition, l'antérieur subsistant avec le nouveau, mais révision perpétuelle des contenus par *approfondissement* et *rature* (Cavaillès, 1946, p. 78).

- Gaston BACHELARD : *Le nouvel esprit scientifique*. Librairie Félix Alcan, Paris, 1934.
- Gaston BACHELARD : *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine*. PUF, Paris, 1936a.
- Gaston BACHELARD : Le surrationalisme. *Inquisitions*, (1), 1936b. Republié dans *Bachelard (1972)*, p. 7-14.
- Gaston BACHELARD : *La formation de l'esprit scientifique. Contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*. Vrin, Paris, 1938a.
- Gaston BACHELARD : Lettre inédite de Gaston Bachelard à Albert Lautman (11 janvier 1938). *Revue d'Histoire des Sciences*, 40(1):129, [1987] 1938b. Editée par Hourya Benis-Sinaceur.
- Gaston BACHELARD : La psychologie de la raison (Entretiens d'été, Amersfoort, 1938). *Actualités scientifiques et industrielles*, (849), 1939. Republié dans *Bachelard (1972)*, p. 27-35.
- Gaston BACHELARD : *La philosophie du non. Essai d'une philosophie du Nouvel esprit scientifique*. PUF, Paris, 1940.
- Gaston BACHELARD : La philosophie scientifique de Léon Brunschvicg. *Revue de métaphysique et de Morale*, 1945. Republié dans *Bachelard (1972)*, p. 169-177.
- Gaston BACHELARD : *Le rationalisme appliqué*. PUF, Paris, 1949.
- Gaston BACHELARD : De la nature du rationalisme. *Bulletin de la Société française de Philosophie*, Séance du 25 mars 1950, 1950a. Republié dans *Bachelard (1972)*, p. 45-88.
- Gaston BACHELARD : L'œuvre de Jean Cavaillès. In Gabrielle Ferrières, *Jean Cavaillès, philosophe et combattant (1903-1944)*, pages 221–234. Presses Universitaires de France, Paris, 1950b. Republié dans *Bachelard (1972)*, p. 178-190.
- Gaston BACHELARD : *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*. Presses Universitaires de France, Paris, 1951a.
- Gaston BACHELARD : *L'actualité de l'histoire des sciences*. Conférence faite au Palais de la Découverte le 20 octobre 1951. 1951b. Republié dans *Bachelard (1972)*, p. 137-152.
- Gaston BACHELARD : *L'engagement rationaliste*. Presses Universitaires de France, Paris, 1972.
- Etienne BALIBAR : Le concept de « coupure épistémologique » de Gaston Bachelard à Louis Althusser. In *Écrits pour Althusser*, Armillaire, pages 9–57. La Découverte, Paris, 1991.
- Hourya BENIS SINACEUR : *Jean Cavaillès. Philosophie mathématique*. Philosophies. PUF, 2019. Deuxième édition revue et augmentée.

- René BOIREL : *Brunschvicg. Sa vie, son œuvre avec un exposé de sa philosophie*. Philosophes. PUF, Paris, 1964.
- Vincent BONTEMS : *Bachelard. Figures du savoir*. Les Belles Lettres, Paris, 2010.
- Anastasios BRENNER : Brunschvicg et l'histoire de la philosophie dans ses rapports avec les sciences. *Revue de métaphysique et de morale*, 111(3):307–320, 2021.
- Léon BRUNSCHVICG : Sur l'implication et la dissociation des notions. *Revue de métaphysique et de morale*, 16:[751]–760, novembre 1908. Republié dans (Brunschvicg, 1954, t. III, p. 19-28).
- Léon BRUNSCHVICG : *Les étapes de la philosophie mathématique*. Félix Alcan, Paris, 1912.
- Léon BRUNSCHVICG : L'idée de la vérité mathématique. *Bull. de la Soc.*, 13e année, n° 1:1–46, janvier 1913. Communication à la Société française de Philosophie, séance du 31 octobre 1912. Republié dans (Brunschvicg, 1954, t. III, p. 80-124).
- Léon BRUNSCHVICG : L'orientation du rationalisme. *Revue de métaphysique et de morale*, XXXII:[261]–343, juillet 1920. Republié dans (Brunschvicg, 1954, t. II, p. 1-81).
- Léon BRUNSCHVICG : *L'expérience humaine et la causalité physique*. Librairie Félix Alcan, Paris, 1922.
- Léon BRUNSCHVICG : Recension de G. Bachelard , *Étude sur l'évolution d'un problème de physique, la propagation thermique dans les solides* et G. Bachelard, *Essai sur la connaissance approchée*. *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, 54:92–94 et 95–101, janvier 1929.
- Léon BRUNSCHVICG : *Les âges de l'intelligence*. Librairie Félix Alcan, Paris, 1934.
- Léon BRUNSCHVICG : *Écrits philosophiques* (3 tomes). Presses Universitaires de France, Paris, 1954. Textes réunis et annotés par Mme A.-R. Weill-Brunschvicg et M. Claude Lehec.
- Georges CANGUILHEM : Sur une épistémologie concordataire. *In Hommage à Gaston Bachelard*, pages 3–12. Presses Universitaires de France, 1957.
- Georges CANGUILHEM : Dialectique et philosophie du non chez Gaston Bachelard. *In Études d'histoire et de philosophie des sciences*, pages 196–207. Vrin, Paris, 1975a. Extrait de la *Revue internationale de philosophie*, n° 66, 4, Bruxelles, 1963.
- Georges CANGUILHEM : L'histoire des sciences dans l'œuvre épistémologique de Gaston Bachelard. *In Études d'histoire et de philosophie des sciences*, pages 173–186. Vrin, Paris, 1975b. Extrait des *Annales de l'Université de Paris*, 1963, n° 1.

- Georges CANGUILHEM : Le rôle de l'épistémologie dans l'historiographie scientifique contemporaine. *In Idéologie et rationalité dans l'histoire des sciences de la vie*, pages 11–36. Vrin, Paris, 1977.
- Jean CAVAILLÈS : *Méthode axiomatique et formalisme. Essai sur le problème du fondement des mathématiques*. Numéro 608-610 in *Actualités scientifiques et techniques*. Hermann, Paris, 1938. Republié dans (Cavaillès, 1994, p. 1-202).
- Jean CAVAILLÈS : *Sur la logique et la théorie de la science*. PUF, Paris, 1946. Texte édité par Georges Canguilhem et Charles Ehresmann. Republié dans (Cavaillès, 1994, p. 473-560).
- Jean CAVAILLÈS : Mathématiques et formalisme. *Revue Internationale de Philosophie*, 8:158–165, 1949. G. Canguilhem (éd.). Republié dans (Cavaillès, 1994, p. 451-472).
- Jean CAVAILLÈS : *Œuvres Complètes de Philosophie des Sciences*. Hermann, Paris, 1994.
- François DAGOGNET : Brunschvicg et Bachelard. *Revue de métaphysique et de morale*, (1):43–54, 1965. Réédité dans *Études Bachelardiennes*, n. 1, 2020, 187-195. Les références renvoient à cette édition.
- François DAGOGNET : Sur une dernière image de la science. *In Bachelard, l'homme du poème et du théorème*, pages 147–155. Éditions universitaires de Dijon, Dijon, 1984.
- Gabrielle FERRIÈRES : *Jean Cavaillès, philosophe et combattant (1903-1944)*. Presses Universitaires de France, Paris, 1950.
- Jean GAYON : Bachelard et l'histoire des sciences. *In Jean-Jacques WUNENBURGER*, éditeur : *Bachelard et l'épistémologie française*, pages 51–113. Presses Universitaires de France, Paris, 2003.
- Albert LAUTMAN : *Les mathématiques, les idées et le réel physique*. Vrin, Paris, 2006.
- Dominique LECOURT : *L'épistémologie historique de Gaston Bachelard*. Vrin, Paris, 1969.
- Dominique LECOURT : *Bachelard. Le jour et la nuit*. Grasset, Paris, 1974.
- Maurice LOI : Bachelard et les mathématiques. *Séminaire de Philosophie et Mathématiques*, 3:1–14, 1984.
- Michel-Elie MARTIN : *Les réalismes épistémologiques de Gaston Bachelard*. Éditions universitaires de Dijon, Dijon, 2012.
- Roger MARTIN : Bachelard et les mathématiques. *In Henri GOUHIER et René POIRIER*, éditeurs : *Bachelard. Colloque de Cerisy [1970]*, pages 46–67. Union Générale d'Éditions, Paris, 1974.

Alain MICHEL : Jean Cavaillès dans l'héritage de Léon Brunschvicg : la philosophie mathématique et les problèmes de l'histoire. *Revue de métaphysique et de morale*, 105(1):9–36, 2020.

Jean-Claude PARIENTE : *Le vocabulaire de Bachelard*. Ellipses, Paris, 2001.

Jean-Claude PARIENTE : Rationalisme et ontologie chez Gaston Bachelard. In Michel BITBOL et Jean GAYON, éditeurs : *L'épistémologie française, 1830-1970*, pages 235–263. Éditions Matériologiques, Paris, 2015.

Frédéric PATRAS : Construire les mathématiques dans l'imagination. *Revue de synthèse*, 136(1-2):75–92, 2015. In [Alunni \(2015\)](#).

Sandra PRAVICA : Relations entre logique, mathématiques et langage. Bachelard et l'empirisme logique. In Jean-François BRAUNSTEIN, Iván Moya DIEZ et Matteo VAGELLI, éditeurs : *L'épistémologie historique. Histoire et méthodes*, pages 23–41. Éditions de la Sorbonne, 2019.

Mary TILES : *Bachelard : science and objectivity*. Cambridge University Press, Cambridge, 1984.