

Éditorial

La phénoménotechnique du temps – Introduction

1. Introduction

Après Bachelard, que savons-nous du temps ? Dans les années 1930, Bachelard assume la rupture épistémologique et ontologique induite par la physique einsteinienne en proposant une philosophie de l'instant. Cent ans après *L'intuition de l'instant* (1932) et la *Dialectique de la durée* (1936), est-ce que les progrès scientifiques et technologiques conservent, déplacent ou annulent la fécondité de la philosophie bachelardienne du temps ? L'épistémologie historique qu'a pratiquée Bachelard¹ exige de poursuivre le travail d'histoire des sciences et de la philosophie pour critiquer les catégories dépassées et actualiser la réalité que pensent les sciences aujourd'hui. Elle se différencie d'autres recherches sociologiques² ou philosophiques contemporaines qui visent à constituer une métaphysique du temps et déterminer le statut ontologique du présent, du passé et du futur ou celui de la durée³ dans la continuité des travaux de J.M.E. McTaggart (1866-1925), à retracer une métaphysique descriptive des modalités temporelles⁴, ou encore, à rendre compte de notre expérience temporelle phénoménologiquement⁵. Bachelard lui-même avait conscience de choisir une troisième voie entre

¹ Selon l'expression qu'invente Dominique Lecourt dans son mémoire de maîtrise pour caractériser sa philosophie des sciences en 1969, *L'Épistémologie historique de Gaston Bachelard*, Paris, Vrin, 2002.

² Hartmut, R., *Accélération. Une critique sociale du temps*, trad. par D. Renault, Paris, La Découverte, 2010.

³ Declos, A. ; Tiercelin, Cl., éd. *La métaphysique du temps. Perspectives contemporaines*, Paris, Collège de France, 2021. Avec les contributions de chercheurs féconds sur le temps : Baptiste Le Bihan, Vincent Grandjean, Philippe Huneman, Robin Le Poidevin. Voir aussi Bouton, Ch., Huneman, Ph., *Temps de la nature, nature du temps*, Paris, CNRS éditions, 2018.

⁴ Wolff, F., *Le temps du Monde*, Paris, Le Seuil, 2023.

⁵ Bouton, Ch., *Le temps de l'urgence*, Lormont : Le bord de l'eau, Bordeaux, 2013 ; Accélération de l'histoire et expériences du temps dans la modernité, *Administration et éducation*, 2023/3, 179 ; Les métamorphoses du temps libre dans la modernité, *Mouvements*, 2023.2, 114 ; Vitesse, accélération, urgence. Remarques à propos de la chronopolitique. *Sens dessous*, 2017/1, 19, p. 75-84. Voir aussi les travaux de Laurent Perreau à la frontière entre phénoménologie et sociologie.

la métaphysique et la phénoménologie : celle de l'épistémologie historique qui cherche à comprendre la conciliation négociée entre la connaissance et la réalité, entre le rationalisme et le matérialisme.

En effet, philosophes et scientifiques confrontent ici leurs analyses philosophiques, épistémologiques, scientifiques et historiques pour, d'une part, analyser la façon dont Bachelard a su caractériser une évolution fondamentale du rapport des sciences au temps qui s'institue à partir d'Einstein, et, d'autre part, interroger l'actualité des concepts et thèses bachelardiens à l'aune de la physique et la métrologie contemporaines. Interroger la réalité contemporaine du temps prolonge le travail des relectures de Bachelard⁶ à la lumière de notre histoire scientifique présente. Ce travail s'inscrit ainsi dans un triple cadre théorique : premièrement, la science est une phénoménoteknique ; deuxièmement, la science et son histoire constituent le cadre fondamental de notre accès au réel ; enfin, l'histoire oblige la science et la philosophie à évoluer, elle oblige l'esprit scientifique à croître et à s'interroger sur le rôle des sciences dans nos sociétés et nos existences.

Éditorial

2. Bachelard, la relativité et le temps

Gaston Bachelard a une place à part dans la philosophie et spécialement dans la philosophie des sciences. En premier lieu, bien que son attrait pour les lettres soit manifeste tout au long de sa vie, son vif intérêt pour les sciences ne s'est jamais démenti. Il s'agit d'ailleurs plus qu'un simple intérêt, même vif, puisqu'il a véritablement pratiqué les sciences. Au début du XX^e siècle, un bac de philosophie en poche, il se tourne vers la technologie de pointe de son époque, la télégraphie, en entrant aux postes et télégraphes. Dans le même temps, il prépare un baccalauréat scientifique puis des études supérieures qui lui permettront de devenir professeur de physique et de chimie dans un collège pendant quelques années. Bachelard consacre alors la première période de son œuvre à comprendre la science contemporaine, ce qu'il nomme sa « valeur inductive », en particulier ce que la science nous apprend sur le temps en niant la durée bergsonienne. La seconde période s'ouvre en 1940, quand Bachelard analyse désormais le mouvement historique de la science, qu'il conçoit comme une négation et thématise sous la figure du non. Cette double compétence en sciences et philosophie fait de lui un témoin privilégié des révolutions qui bouleversent la physique en ce début de XX^e siècle : la relativité, d'une part, et la mécanique quantique, d'autre part. Nul ne comprendra mieux que lui les changements radicaux de paradigmes qui en découleront. Son ouvrage *Le nouvel esprit scientifique*, publié en 1934, témoigne à la fois de la finesse de sa compréhension des théories modernes en mathématique et en physique mais aussi de la profondeur de ses réflexions philosophiques induites par ces théories. C'est

⁶ Alunni, Ch., *Spectres de Bachelard*, Paris, Hermann, 2019, p. 6.

dans ce cadre qu'il reprend son concept de *phénoménoteknique* défini quelques années plus tôt⁷ :

les instruments ne sont que des théories matérialisées. Il en sort des phénomènes qui portent de toutes parts la marque théorique. Entre le phénomène scientifique et le noumène scientifique, il ne s'agit donc plus d'une dialectique lointaine et oisive, mais d'un mouvement alternatif qui, après quelques rectifications des projets, tend toujours à une réalisation effective du noumène. La véritable phénoménologie scientifique est donc bien essentiellement une phénoménoteknique.⁸

En effet, la physique moderne, et la mécanique quantique tout particulièrement, troublent jusqu'à la confusion la plus totale le bel ordre kantien de l'idéalisme transcendantal : à l'instar de beaucoup d'autres concepts de la physique, tels que particules et ondes, par exemple, les notions de noumène et de phénomène sont complètement intriquées ! Le philosophe cherche alors à comprendre la négation qu'opère la science contemporaine en montrant comment, grâce aux mathématiques, elle accède à une rationalité abstraite totalement étrangère à nos perceptions et nos intuitions ordinaires. La substance devient une sur-stance ou une ex-tance, et la raison une puissance de divergence, qui délaisse nos intuitions ordinaires, s'émancipe des habitudes de pensée pour induire des synthèses capables de concilier l'onde et le corpuscule dans le photon, l'éternalisme de la relativité générale (au sens de McTaggart), l'entropie des systèmes et l'irréalité du temps en mécanique quantique dans l'instant (au sens de Rovelli).

La science sait mieux, autrement et plus, que nous ne savons dire et nommer avec nos mots usuels. Le langage et la pensée doivent se convertir pour exprimer ce que sait la physique mathématique.

Celle-ci n'offre pas seulement un langage précis pour décrire les choses comme les thématisent les théoriciens du Cercle de Vienne⁹ : elle structure tout autant le réel et notre esprit. Face au logicisme qu'il critique, Bachelard promeut un style ingénieur, celui qu'il voulut être au début de son activité professionnelle dans les télécommunications. Plus fondamentalement, connaître une chose n'est pas tant la définir, que savoir la fabriquer d'abord théoriquement, puis expérimentalement, voire industriellement. Ainsi les techniques ne se réduisent pas à une application des sciences en vue d'agir sur le réel selon nos intérêts et utilités, mais exprime précisément la dialectique de la connaissance et du réel qui se joue historiquement. Elles dégagent « le caractère philosophique nouveau de ce rationalisme et de ce réalisme associé, l'un et l'autre essentiellement actualisés dans des techniques formulées par des théories mathématiques »¹⁰. La science induit, au sens où elle produit dans un champ déterminé, la rationalité et le réel. Elle sait et agit tout ensemble : les instruments scientifiques, les objets techniques, les

⁷ Bachelard, G., « Noumène et microphysique », 1931-1932, in : *Études*, Paris, Vrin, 1970, p. 11-24.

⁸ Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, PUF, 2013, pp. 16-17.

⁹ Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, op. cit.

¹⁰ Bachelard, G., *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1951, p. 2.

dispositifs et les infrastructures expriment cette dialectique opératoire. Du coup, elle se trouve obligée de nier d'abord les objets et les logiques ordinaires pour les transformer. Certes, la science traite du réel, mais elle ne le décrit pas comme s'il préexistait dans un monde naturel : elle détermine la réalité dans laquelle nous existons, non seulement à travers les instruments, machines et technologies que nous utilisons, mais aussi à travers la sémantique et la grammaire selon lesquelles nous pensons et disons le réel et nous-mêmes¹¹. Est réel ce que la science sait et fait à un moment déterminé. En d'autres termes, la science réalise ses objets, elle est phénoménotechnique¹². Elle ne vise plus des entités naturelles, anhistoriques, universelles ou éternelles, comme le supposaient Newton ou Laplace, mais un moment d'un long processus de transformation de nos esprits et du réel. Du même coup, la technique ne consiste pas en une activité connexe, accessoire ou secondaire de la science, mais exprime la fonction fabricatrice de la raison. « Un concept est devenu scientifique dans la proportion où il est devenu technique, où il est accompagné d'une technique de réalisation »¹³. Le réalisme scientifique de Bachelard ne signifie pas pour autant un constructivisme ou un relativisme au sens sociologique du « programme fort » de David Bloor : il désigne un réalisme historique, qui trace la fonction nouménale réalisant le noumène en tant que phénomène. Cette fonction nouménale agit comme l'induction électromagnétique : en reliant des phénomènes de champs distincts, elle produit un effet réel mixte. L'expérience scientifique devient une synthèse phénoménale, un schématisme d'un nouveau genre capable d'histoire, d'évolution, de nouveauté, dans la mesure justement où les catégories de l'entendement évoluent et se transforment. Ainsi la science suscite une création continue et indéfinie, qui reconfigure notre histoire et nous-mêmes. La pensée mathématique de la science alliée aux technologies contemporaines constitue une dialectique de la création ou de la construction qui organise des dispositifs phénoménotechniques. Bachelard nomme cette seconde nature réalisée par la raison humaine une *natura constructa* : elle ne se réduit pas à reproduire, copier ou ressembler à la nature, mais elle produit des phénomènes en réorganisant et renouvelant le réel¹⁴. Cette seconde nature rompt avec le sens commun et les soucis pratiques en ce qu'elle réalise des noumènes rendus possibles par les mathématiques qui organisent désormais le réel et le rationnel. Nos esprits doivent alors se hausser à l'échelle de la science contemporaine selon un effort sans cesse renouvelé : « En somme la science instruit la raison. *La raison doit obéir à la science, à la science la plus évoluée, à*

¹¹ Feyerabend, P., *Realism and the historicity of knowledge*, "Journal of Philosophy", 86, 1989, 393-406.

¹² Bachelard, G., « Noumène et microphysique », [1970], p. 19 ; Bachelard, G., *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1967, p. 71. Voir aussi Pariente, J.C., *Le Vocabulaire de Bachelard*, Paris, Ellipses, 2001. Rheiberger, Hans Jörg, *Gaston Bachelard and the notion of « phénoménotechnique »*, « Perspectives on science », 13/3, 2005, p. 313-328. Fabry, L., *Phénoménotechnique : Bachelard's Critical Inheritance of Conventionalism*. « Studies in History and Philosophy of Science », Part A, Elsevier, 2019, p. 34-42.

¹³ Bachelard, G., *La formation de l'esprit scientifique*, op. cit., p. 71.

¹⁴ Bachelard, G., *L'engagement rationaliste*, Paris, PUF, 1972, p. 50.

la science évoluant »¹⁵. Ainsi l'histoire scientifique du temps raconte la fabrique du temps, au sens où le temps détermine progressivement plusieurs figures de l'objectivité scientifique, qui constituent notre réalité temporelle à différentes époques historiques : réversible et absolu dans la mécanique classique, puis irréversible et entropique en thermodynamique, dépourvu de simultanéité absolue dans la relativité restreinte, différencié en espace-temps se déployant dans un univers bloc de façon éternaliste, ou peut-être purement local dans le sens spatiotemporel. Ressaisir la dialectique à l'œuvre dans les sciences régionales invite à « une philosophie dispersée »¹⁶ capable de s'appliquer à chaque région en acceptant de se débarrasser de la belle unité a priori du temps absolu de la science newtonienne. Pour un physicien du temps, rien n'illustre mieux cette phénoménotéchnique que l'évolution de la définition de l'unité de temps, la seconde, au cours du XX^e siècle. Dans la première moitié de ce siècle, cette définition est basée sur la rotation de la Terre, c'est-à-dire la durée du jour : la seconde est la 1/86400^{ème} partie du jour solaire moyen¹⁷. Le temps est donc ce noumène dont nous avons l'intuition théorique sans pourtant l'appréhender complètement, pour paraphraser Augustin, alors que la durée du jour est le phénomène expérimental que nous pouvons observer et mesurer précisément. Mais tout bascule avec l'invention de l'horloge atomique à jet de Césium et surtout avec l'adoption de la seconde atomique en 1967 dont la définition devient totalement absconse pour le non-physicien : La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 au repos, à la température du zéro absolu¹⁸. Ainsi, pour mesurer le temps, on utilise le phénomène expérimental réalisé par l'horloge atomique qui met en jeu des atomes de Césium qui, comme tous les atomes, possèdent des niveaux d'énergie définis par leur structure atomique, c'est à dire le nombre quantique principal, l'orbitale, le moment magnétique et le « spin » de chacun de leurs électrons et donc qui peuvent changer de niveau d'énergie en absorbant ou en émettant un photon dont la fréquence confère une énergie, suivant la relation de Planck, exactement égale à la différence entre deux niveaux d'énergie de l'atome ! Et c'est précisément cette fréquence que l'on observe dans le cas d'une horloge atomique et que l'on va considérer comme notre nouvelle référence de temps...

Autrement dit, il faut au préalable maîtriser et avoir confiance dans la théorie quantique, cette construction intellectuelle très mathématisée et pour le moins, étonnante, pour mettre en évidence le phénomène expérimental sur lequel on va s'appuyer. Où est le noumène ? Quel est le phénomène ? Pour aller au-delà de la citation de Bachelard ci-dessus, on pourrait même dire qu'une

¹⁵ Bachelard, G., *La philosophie du non. Essai d'une philosophie du Nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, 1940, p. 144.

¹⁶ Bachelard, G., *La philosophie du non*, op. cit., p. 50.

¹⁷ Une journée se divise en 24 heures de 60 minutes de 60 secondes : $24 \times 60 \times 60 = 86400$ secondes par jour.

¹⁸ Comptes-rendus de la 13^e CGPM (1967), Sèvres, 1969, p. 103.

horloge atomique sent la théorie à plein nez ! On est à mille lieux du balancier de l'horloge mécanique dont les oscillations constituent un pur phénomène expérimental...

L'autre révolution scientifique du XX^e siècle, la relativité, est moins déroutante du point de vue épistémologique dans la mesure où elle ne s'attaque pas directement aux fondements même de la physique et par là au réalisme cher aux physiciens. Elle n'en bouleverse pourtant pas moins notre conception de l'espace et du temps. Bachelard, dans son ouvrage *La valeur inductive de la relativité*, publié en 1929, prouve qu'il en a une compréhension exhaustive que ce soit dans le formalisme mathématique tensoriel qui est nécessaire au développement de la relativité générale ou dans les conséquences qu'elle implique sur l'espace et le temps. En effet, la relativité nous emmène dans un monde où le temps cesse d'être absolu puisqu'il dépend du référentiel dans lequel on se situe ; la notion de simultanéité devient une convention arbitraire ; l'espace et le temps se mêlent pour former l'espace-temps ; cet espace-temps n'est plus le contenant et l'univers le contenu mais ils sont dans une telle interaction qu'ils en deviennent indissociables. De plus, Bachelard ne tombe pas dans les multiples pièges que la relativité tend au sens commun, en particulier la notion même de relativité.

Il écrira à juste titre que « La relativité est une doctrine de l'absolu »¹⁹, tournant ainsi le dos à nombre de penseurs qui croyaient y trouver un argument de poids pour justifier le relativisme philosophique !

3. Physique et métaphysique du temps

Newton pensait que l'espace et le temps formaient un cadre unique dans lequel l'univers évoluait. Comme nous venons de le voir, Einstein apporte une vision du monde radicalement différente. À partir de deux postulats partagés par tous les physiciens d'aujourd'hui que sont (1) la relativité galiléenne et (2) la constance de la vitesse de la lumière dans tout référentiel²⁰, il démontre grâce à une expérience de pensée très simple que le temps ne peut-être absolu²¹. Pour ce faire, il donne tout d'abord une définition de la synchronicité : imaginons deux points distincts A et B , immobiles dans notre référentiel. On place une horloge au voisinage immédiat de chacun de ces deux points. On supposera ces deux horloges parfaitement identiques. On envoie un faisceau lumineux de A vers B qui se réfléchit en B pour revenir en A . On note t_A sur l'horloge A , l'instant où le faisceau passe une première fois en A , t_B sur l'horloge B l'instant où le faisceau passe en B et t'_A sur l'horloge A

¹⁹ Bachelard, G., *La valeur inductive de la relativité*, Paris, Vrin, 2014.

²⁰ Ce postulat a commencé à apparaître au début du XX^e siècle suite à l'expérience de Michelson-Morley (Michelson, A.A. ; Morley, E. W., *On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether*, « American Journal of Science », vol. s3-34, no 203, 1er novembre 1887, p. 333-345.

²¹ Einstein, A., *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, « Annalen der Physik », vol. 322, n° 10, 26 septembre 1905, pp. 891-92.

l'instant où le faisceau revient en A . Pour Einstein, les horloges en A et en B sont synchrones si $t_B - t_A = t'_A - t'_B$.

Imaginons maintenant que les deux points A et B constituent les extrémités d'une barre rigide animée d'une translation rectiligne uniforme de vitesse v par rapport à notre référentiel et dans la direction de AB . Un observateur, qui se déplace avec la tige, mesure le temps en utilisant des horloges au repos dans notre référentiel, identiques, parfaitement synchronisées et distribuées sur toute la trajectoire de la barre.

En observant dans ces conditions l'aller et retour du faisceau lumineux entre les points A et B , l'observateur notera :

$$t_B - t_A = \overline{AB}/(c-v)$$

et

$$t'_A - t'_B = \overline{AB}/(c+v)$$

où c est la vitesse de la lumière. Comme le dit Einstein « nous ne devons pas attribuer une signification absolue à la notion de simultanéité et deux événements qui sont simultanés vus d'un certain référentiel, ne peuvent plus être considérés comme des événements simultanés, vus depuis un système en mouvement par rapport à ce référentiel »²². Ainsi donc, si deux observateurs sont en mouvement l'un par rapport à l'autre, ils ne dateront pas les événements dont ils sont témoins à la même heure. Il n'y a donc pas qu'un seul temps pour tout l'univers mais une infinité, attachés à une infinité de référentiels différents. Par conséquent, deux événements simultanés dans un référentiel donné ne le seront généralement pas dans un autre référentiel.

Cette conception du temps, bien que maint fois vérifiée grâce à des expériences utilisant des horloges atomiques, n'a rien à voir avec notre vécu du temps. Il nous paraît légitime de nous poser la question de savoir ce qu'il se passe maintenant à un autre point du globe, voire à un autre endroit de l'univers, sur la galaxie Andromède, par exemple. Pourtant, contre toute attente, une telle question n'admet pas forcément une réponse unique et précise. Elle dépend non seulement de la vitesse relative de nos deux galaxies mais aussi de conventions tout à fait arbitraires.

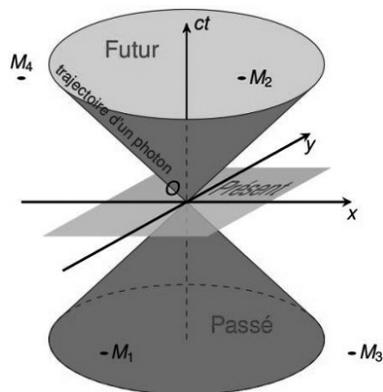


Figure 1: Exemple de diagramme de Minkowski. Seules 2 des 3 dimensions d'espace (directions Ox et Oy) sont représentées pour permettre de représenter l'axe des temps verticalement. Pour des raisons d'homogénéité des dimensions, le temps t a été multiplié par la vitesse de la lumière c .

²² *Ibidem*, p. 897.

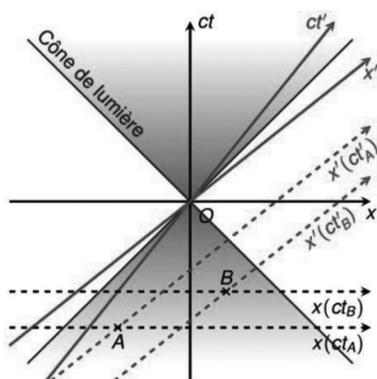


Figure 2: Diagramme de Minkowsky réduit à une dimension d'espace et la dimension de temps.

l'instant $t=0$: il s'agit du cône représenté en bleu sur la figure 1. En effet, puisqu'un photon se déplace à la vitesse de la lumière, il parcourt une distance $d=ct$ ce qui correspond à l'équation de la surface du cône. Puisqu'aucun corps massif ne peut atteindre la vitesse de la lumière, la trajectoire de tout corps massif passant par le point O à $t=0$ ne peut se trouver qu'à l'intérieur du cône de lumière. En revanche, tous les points qui se trouvent à l'extérieur du cône de lumière correspondent à la position de corps qui ne passeront pas en O , s'ils sont situés dans le passé (par exemple M_3), ou qui ne sont pas passés en O , s'ils sont dans le futur (par exemple M_4). Puisque rien ne se déplace plus vite que la vitesse de la lumière, pas même les interactions des 4 forces de la physique (gravitationnelle, électromagnétique, interaction faible, interaction forte), les points situés en dehors du cône de lumière ne peuvent pas avoir eu d'influence causale sur O s'ils sont dans le passé, ou ne peuvent pas avoir été causalement influencé par O s'ils sont dans le futur. En revanche, les points dans le cône de lumière passé de O (par exemple M_1) peuvent avoir causalement influencé O et les points dans le cône de lumière futur de O (par exemple M_2) peuvent avoir été causalement influencé par O . C'est principalement dans l'étude des rapports causaux entre événements que réside l'avantage d'utiliser ce type de diagramme.

Pour simplifier le problème, nous ne considérerons qu'une seule dimension d'espace, que nous noterons x et la dimension de temps ct . Imaginons que nous

²³ Minkowski, H., *Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern*, « Nachrichten der k. Gesellschaft der Wissenschaft zu Göttingen », mathematisch-physikalische Klasse, 1908.

²⁴ Einstein, A., *ibidem*.

Pour illustrer ce propos, étudions une représentation de l'espace-temps relativiste imaginée par le mathématicien et physicien théoricien Hermann Minkowski²³ à la suite de la publication d'Einstein sur la relativité restreinte²⁴. La figure 1 représente un tel diagramme pour lequel l'espace a été limité aux seules dimensions x (axe horizontal transverse) et y (axe horizontal longitudinal). La dimension z a été escamotée pour faire figurer l'axe du temps, noté ct (axe vertical), où c , la célérité de la lumière, confère à cette dimension temporelle une grandeur équivalente à une distance, comme pour les dimensions x et y . Ce type de diagramme, communément appelé cône de lumière, présente la particularité de représenter explicitement le passé (en bas), le présent (l'hypersurface grise qui, ici, se trouve être une surface puisque nous avons supprimé l'axe Oz) et le futur (en haut). Il permet aussi de représenter les trajectoires de tous les faisceaux lumineux passant en O à

soyons immobiles au point O à l'instant $t=0$ (voir figure 2). Comme nous ne nous déplaçons pas dans la direction x , notre trajectoire dans l'espace-temps de Minkowski suivra la direction ct . Nous serons en quelque sorte « emportés » par le temps suivant l'axe vertical. L'autre axe, suivant la direction x , correspond à tous les points qui se trouvent également à $t=0$, autrement dit notre présent (en réalité il s'agirait d'un hyperplan 3D dans l'espace-temps à 4 dimensions)²⁵. Imaginons maintenant un passant qui se déplace à vitesse constante de gauche à droite et qui nous croise à l'instant $t=0$ (droite rouge labélisée ct' sur la figure 2). La trajectoire du passant qui nous croise en O est appelée sa ligne d'univers. L'autre ligne (droite rouge labélisée x' sur la figure 2 qui, en réalité, est également une hypersurface 3D dans l'espace-temps à 4 dimensions) contient tous les points simultanés au passant à un instant donné.

Ainsi, dans notre espace-temps réduit à 2 dimensions, les hypersurfaces des présents se réduisent à deux droites, l'une horizontale pour notre propre présent, l'autre inclinée pour celui du passant. Cette représentation du monde montre que le présent des uns n'est pas le présent des autres et que la séparation entre passé et futur n'est pas aussi universelle qu'on le croit ! En effet, l'ordre chronologique des événements peut ne pas être le même dans deux référentiels différents (comme les événements A et B dans la figure 2 où $t_B > t_A$ mais $t'_B < t'_A$).

Comment, dans ces conditions, peut-on continuer à adhérer au présentisme qui considère que seul le présent est, que le passé n'est plus et que le futur n'est pas encore ? La question est capitale puisque c'est précisément cette conception du monde qui sous-tend notre comportement. Si c'est le passé qui a créé le présent et que le présent conditionne le futur, nous sommes confortés dans notre habitude de choisir les actions que nous avons à mener afin de préparer le futur qui nous semble le meilleur.

Mais, à l'inverse, le caractère illusoire du présent et de la distinction entre passé et futur nous impose de considérer sérieusement la thèse opposée au présentisme, l'*éternalisme*, doctrine selon laquelle l'espace-temps à 4D serait figé dans un « univers-bloc », où chaque référentiel ne générerait qu'une orientation contingente de l'axe du temps et donc de l'hypersurface du présent. Dans ce cas, non seulement la séquence passé-présent-futur ne serait qu'une illusion, une sorte d'effet de perspective²⁶, mais il en serait de même pour notre libre-arbitre ! Dès le début du XX^{ème} siècle, le philosophe anglais McTaggart a mis en cause la véracité de l'écoulement du temps²⁷, trois ans seulement après la publication de l'article fondateur de la relativité restreinte d'Einstein²⁸. Pourtant, cet article ne semble pas avoir eu d'influence directe sur la pensée de McTaggart. Néanmoins, la controverse sur la métaphysique du temps provoquée par l'article d'Einstein en a été le contexte. En

²⁵ Cet hyperplan de simultanéité, qui apparaît naturellement en utilisant les formules de changement de référentiel appelées les équations de Lorentz, résulte en réalité d'un choix implicite d'Einstein. Bien que ce choix s'avère de loin le plus commode, d'autres conventions existent en relativité restreinte. Néanmoins, cela ne change rien au raisonnement ci-dessous.

²⁶ Vigoureux, J.M., *L'univers en perspective*, Paris, Ellipses, 2006.

²⁷ McTaggart, J.M.E., *The Unreality of Time*, "Mind", vol. 17, pp. 457-73, 1908.

²⁸ A. Einstein, *ibid.*

effet, à partir d'arguments complètement différents, McTaggart conclut également à l'irréalité du temps. Ces deux approches concourantes, en plus de heurter de plein fouet notre conception intime du temps, s'opposent également à des principes bien établis en physique comme la causalité ainsi que la flèche du temps induite par le concept d'entropie en thermodynamique. Si le temps n'a pas d'existence réelle, comment pourrait-il avoir un sens d'écoulement !

La causalité, comme l'a montré Bouton²⁹, ne s'oppose cependant pas à la relativité, tout au moins pas dans son sens restreint. En effet, comme nous l'avons montré ci-dessus, on peut tout-à-fait observer des inversions chronologiques entre deux événements particuliers A et B en changeant le référentiel depuis lequel on les observe ; c'est d'ailleurs ce qui constitue la principale justification de l'univers-bloc. En revanche, on peut démontrer qu'il en va tout autrement lorsqu'on considère des événements liés du point de vue de la causalité dans le contexte de la relativité restreinte. Pour ce faire, il nous faut tout d'abord introduire l'opérateur relationnel « *est antérieur à* » symbolisé par \prec . Ainsi $A \prec B$ signifie que l'événement A est antérieur à l'événement B au sens causal, c'est à dire que A pourrait (le conditionnel est d'importance) être cause de B . Corollairement, il en résulte que B doit être dans le cône de lumière de A sans quoi l'influence de A sur B devrait se propager à une vitesse plus grande que celle de la lumière, ce qu'interdit la théorie de la relativité. La nouveauté réside dans l'impossibilité de trouver un repère pour lequel $B \prec A$, ou même $A \not\prec B$, s'il existe un référentiel pour lequel $A \prec B$. La causalité est donc conservée en relativité restreinte. Le problème se complique en relativité générale mais, si certaines topologies exotiques pourraient conduire théoriquement à des inversions de causalité, leur caractère réaliste reste en débat. En tout état de cause, aucune violation de causalité n'a encore été observée à ce jour.

La causalité reste donc un principe valide tant qu'il n'a pas été contredit ! Par conséquent, même s'il a les faveurs de plusieurs physiciens dont Einstein qui a écrit peu avant sa mort « *Pour nous, physiciens dans l'âme, la distinction entre passé, présent et futur ne garde que la valeur d'une illusion, si tenace soit-elle* »³⁰, l'univers-bloc n'est donc toujours pas une fatalité et il reste encore une place pour le libre-arbitre.

4. Les scientifiques font-ils le temps ?

Le présent d'un référentiel pourrait bien être une hypersurface de l'espace-temps parmi d'autres, jetant ainsi le trouble sur la réalité physique d'une des acceptions de ce que nous avons l'habitude de considérer comme le temps, mais il n'en demeure pas moins que la grandeur physique que nous mesurons avec nos horloges

²⁹ C. Bouton, *Le futur est-il déjà présent ?* in Bouton, C., Huneman, P., *Temps de la nature, nature du temps. Études philosophiques sur le temps dans les sciences naturelles*, Paris, CNRS éditions, 2018, p. 115-148.

³⁰ Einstein, A., *Lettre à la famille de Michele Besso* (1955), in Einstein, A., *Œuvres choisies*, t. 5, Seuil, 1991, p. 119.

et que nous nommons aussi, peut-être par abus de langage, le temps, est la grandeur mesurée avec la plus extrême précision³¹ et de très loin. Mais que mesure-t-on exactement ? Comme l'a montré Bachelard avec son concept de phénoménotech-nique, théorie et expérience sont étroitement intriquées. Qu'est-ce que mesure alors une horloge atomique ? Selon Einstein, le temps est ce que mesure une horloge³². Mais si l'on définit une horloge comme étant l'instrument qui mesure le temps, nous voilà confrontés à deux définitions circulaires et nous ne sommes pas plus avancés ni sur la nature du temps, ni sur ce que mesure une horloge ! Pourtant, le réalisme des physiciens assimile la mesure donnée par les horloges comme étant la meilleure approximation du « temps vrai de la physique » qui, localement, serait unique dans le référentiel considéré, continu et s'écoulerait de façon parfaitement régulière. Pour autant, les physiciens sont bien conscients des contradictions entre ces propriétés. Tout irait pour le mieux dans un univers vide régi par la relativité restreinte mais notre monde réel est matériel et nous impose donc d'utiliser la relativité générale et d'ajouter le terme « localement » à toutes les propriétés énoncées ci-dessus. Cet adverbe réduit considérablement l'idée de temps vrai ! À l'heure des horloges optiques, il est possible de déceler des écarts dans l'écoulement du temps entre deux horloges dont l'altitude diffère d'une dizaine de centimètres seulement. Il faut donc définir l'échelle de temps de référence mondial établi par le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), que l'on continue de qualifier d'« universel » (UTC : Temps *Universel* Coordonné), comme valide seulement sur une surface enveloppant la Terre dont le potentiel gravitationnel est constant et dont l'altitude est arbitrairement choisie comme valant 0. Cette surface de référence correspond à ce que l'on appelle communément le niveau de la mer. Toute différence d'altitude par rapport à cette référence doit être connue au moins à 1 cm près. Les 450 horloges atomiques qui participent au calcul d'UTC doivent donc envoyer, en plus du temps local qu'elles indiquent, leur altitude précise. Le BIPM se charge alors de corriger le temps local de chacune de ces horloges pour le ramener au niveau de l'altitude 0 et d'en faire une moyenne pondérée pour constituer UTC³³.

Chaque mois, le BIPM publie la « circulaire T » qui donne l'écart par pas de 5 jours entre le temps donné par chacune des horloges et UTC pour le mois écoulé (voir <https://www.bipm.org/fr/time-ftp/circular-t>). Ainsi, bien qu'il soit totale-

³¹ Les métrologues du temps se méfient de l'emploi du terme « précision » qu'ils jugent trop... imprécis ! Ils lui préfèrent des notions mieux définies comme l'*exactitude* et la *stabilité* (voir BIPM et al., *The international vocabulary of metrology – VIM*, 3rd edn, 2012, <http://www.bipm.org/vim>).

³² Einstein, A., *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, « *Annalen der Physik* », vol. 322, n° 10, 26 septembre 1905, p. 893.

³³ Le calcul d'UTC est un peu plus compliqué : le temps moyen de ces horloges s'appelle l'Échelle Atomique Libre (EAL) ; EAL est ensuite corrigé grâce à des étalons de fréquence pour que l'écoulement du temps soit conforme à la définition de la seconde : c'est le Temps Atomique International (TAI) ; UTC correspond à TAI augmenté périodiquement de secondes intercalaires de telle sorte qu'il ne s'éloigne pas du temps donné par la rotation de la terre (UT : Temps Universel) de plus de 0,9 s. On trouvera une explication complète sur le site du BIPM, notamment : https://www.bipm.org/documents/20126/59466374/6_establishment_TAR20.pdf.

ment compatible avec la relativité générale, la définition officielle du temps repose sur plusieurs assertions dont on a trop tendance à oublier le caractère arbitraire, comme par exemple : « le temps est la grandeur mesurée par les horloges atomiques » ou « l'écoulement du temps est parfaitement continu ».

Pourtant, nous ne sommes sûrs d'aucune de ces prétendues propriétés. En effet, le temps vu par certains micro-physiciens, en particulier le temps de la gravitation quantique à boucle, n'a rien à voir à voir avec ce temps idéalisé, de même d'ailleurs que l'espace. Il n'est ni unique, ni régulier, ni continu. On parle même de « mousse de spin »³⁴ qui, en ajoutant l'ingrédient causalité, pourrait conduire à une « écume d'espace-temps »³⁵. Il y a sans doute autant d'écart entre le temps prétendu continu et cette mousse de temps qu'entre la notion de particule imaginées comme des petites billes à la fin du XIX^e siècle et le modèle de fonction d'onde dans leur conception quantique. Enfin, la cosmologie quantique impose également un « temps de Planck » :

$$t_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \approx 5 \cdot 10^{-44} \text{ s}$$

où \hbar représente la constante de Planck réduite, G la constante de la gravitation universelle et c la vitesse de la lumière.

Selon certains auteurs, ce t_p pourrait constituer le quantum de temps. Nous serions alors dans un monde stroboscopique où chaque pas de temps discret s'égrainerait t_p après t_p . La vision des physiciens interpolant le temps des horloges pour en faire un temps parfaitement continu pourrait donc bien paraître naïve même si nous ne sommes pas prêts d'approcher des intervalles de temps de l'ordre de 10^{-43} s ; nous en sommes, dans le meilleur des cas à l'atoseconde (10^{-18} s), soit un fossé d'un facteur 10^{25} à combler : autant qu'entre une atoseconde et un siècle !

Pour en revenir à UTC, il s'agit donc bel et bien d'une idéalisation du temps au sens platonicien du terme. C'est pourtant ce temps idéalisé que la société adopte implicitement et qui est considéré par tous comme la référence de temps indiscutable. C'est le temps scientifique par excellence, dont la véracité semble au-dessus de tout soupçon. Nous, métrologues du temps, ne sommes-nous pas devenus ainsi les fabricants du temps ? Avec nos horloges atomiques, nous fabriquons peut-être un temps que l'humanité entière adopte même s'il n'est pas conforme à la réalité ? Cette question est d'importance lorsqu'on observe le rôle qu'a pris la mesure du temps dans la société, qu'il soit explicite (télécommunications, transport, finance, énergie, etc.) ou implicite (positionnement, spatial, etc.). Sommes-nous responsables de tous les excès qui auraient été impossibles sans une telle maîtrise du temps : trading haute-fréquence, frappes « chirurgicales » de missiles, etc. ?

³⁴ Rovelli, C., *Et si le temps n'existait pas ?*, Dunod, 2012, p. 128 [Rovelli, C., *Che cos'è il tempo? Che cos'è lo spazio?*, Roma, Di Renzo, 2014].

³⁵ Lachièze-Rey, M., *ibidem*, p. 377.

Alors qu'en est-il du temps : est-ce une grandeur qui existe par elle-même et qu'on ne peut, au mieux, que mesurer, comme le pense le physicien réaliste, qui considère qu'UTC est la meilleure approximation du temps réel ? Ou bien est-ce qu'UTC, qui est une pure création des métrologues, n'aurait de validité que parmi les métrologues, conformément à une certaine approche relativiste (au sens épistémologique et non pas einsteinien). Et si, plutôt que de trancher entre ces deux positions extrêmes, on se tournait plutôt vers la phénoménotechnique de Bachelard ?

Dans un contexte bachelardien, la question pourrait alors être reformulée de la façon suivante : est-ce que le temps peut être sujet de la phénoménotechnique Bachelardienne ? Si la réponse est "oui" alors on a en effet un faux dilemme, car les phénomènes scientifiques sont provoqués par l'expérience, par une technique de réalisation³⁶ « *La phénoménotechnique étend la phénoménologie. Un concept est devenu scientifique dans la mesure où il est devenu technique, où il est accompagné d'une technique de réalisation* »³⁷. Et à la fois ces mêmes phénomènes scientifiques ont une dimension nouménique, une structure mathématique issue de l'esprit de l'expérimentateur « *Le microscope est un prolongement de l'esprit plutôt que de l'œil* »³⁸. Du coup ce ne serait pas "connaître *ou* fabriquer le temps", mais "connaître *et* fabriquer le temps", donc point de dilemme. Mais est-ce que la réponse est bien "oui" ? Est-ce que le temps est bien phénoménotechnique ? Nous n'allons pas trancher. En quelque sorte, c'est le sujet de la troisième partie de cet ouvrage, et il serait présomptueux de vouloir la court-circuiter par un simple "oui" ou "non". Au mieux cette question peut être un fil conducteur utile pour le lecteur qui examine les différentes contributions qui suivent, en espérant qu'arrivé à la fin il ou elle aura un aperçu un peu plus approfondi et diversifié de cette problématique, si pas forcément plus clair pour autant.

Pour nous guider, la dialectique Bachelardienne entre le noumène, la théorie mathématique, et le phénomène expérimental, peut éclairer notre compréhension du temps. Le phénomène scientifique est issu de la dialectique entre l'esprit et la technique de réalisation :

*Cette liaison si forte, si indispensable de la théorie à la technique nous paraît devoir s'énoncer comme un déterminisme humain très spécial, comme un déterminisme épistémologique qui n'était guère sensible il y a quelques siècles dans la séparation des cultures mathématiques et expérimentales.*³⁹

L'expérimentateur n'observe pas simplement les faits, il les conditionne par sa démarche. Guidé par des concepts théoriques et abstraits, il invente des expériences et construit des instruments qui participent à l'émergence du phénomène scientifique. C'est cela qui nous permet de structurer le monde : « Le

³⁶ Cette contribution est inspirée, en partie, de : Juliette Grange. L'invention technique et théorique : la philosophie des sciences de G. Bachelard. Imaginaire, Industrie et innovation, Pierre Musso; Centre culturel de Cerisy, Sep 2015, Cerisy-la-Salle, France. pp.90. halshs-01336345.

³⁷ Bachelard, G., *La formation de l'esprit scientifique*, op. cit., p. 61.

³⁸ *Ibidem*, p. 242.

³⁹ Bachelard, G., *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, PUF, 1951, p. 223.

véritable ordre de la Nature c'est l'ordre que nous mettons techniquement dans la Nature »⁴⁰. Non seulement celui du laboratoire scientifique mais bien au-delà, la nature elle-même. Et en faisant cela, c'est l'expérimentateur lui-même qui se renouvelle : « *L'expérimentation nouménale dans le laboratoire se poursuit à grande échelle et à ciel ouvert. Ce dépassement de la Nature est aussi mutation de l'homme* »⁴¹. Appliquons cette pensée à un exemple particulier : Einstein nous dit au début de son papier de 1905 « Il apparaît possible, que toutes les difficultés concernant la définition du "temps" pourraient être surmontées en remplaçant "temps" par "position de la petite aiguille de ma montre" »⁴². Il continue en remarquant que si une telle définition est bien suffisante tant qu'on s'intéresse à des événements qui ont lieu uniquement à l'endroit où se trouve ma montre, cela n'est plus suffisant quand il faut lier entre eux des événements distants, c'est-à-dire dans la plupart des cas pratiques, comme par exemple l'affirmation : « *une kilonova a été observée par le télescope VISTA au Cerro Paranal (Chili) et un signal d'onde gravitationnelle au détecteur Virgo (Pise) en même temps* ». Que veut donc dire "en même temps" dans ce cas ? Pour de tels cas, Einstein développe une construction mathématique et physique définissant d'une manière opérationnelle une simultanéité et donc une synchronisation d'horloges distantes. Du coup il définit un "temps" au-delà de ma montre⁴³. Notons que cette définition d'Einstein n'est pas unique en relativité, d'autres définitions existent et sont couramment utilisées, par exemple pour les échelles de temps que nous utilisons tous les jours comme le temps universel coordonné (UTC). Mais tentons donc une analyse phénoménoteknique de ce "temps" d'Einstein. On remarque d'abord l'émergence de ce temps à partir d'un instrument technologique construit par l'expérimentateur ("ma montre", du pendule à l'horloge atomique). Mais il faut y rajouter la théorie, l'esprit de l'expérimentateur (Einstein en l'occurrence⁴⁴) qui fabrique tout une construction mathématique et opérationnelle pour finir avec un "temps" satisfaisant. Ces deux aspects sont parfaitement dans la pensée phénoménoteknique de Bachelard. Il paraît donc clair, que le temps en relativité restreinte est bien et pleinement sujet à la phénoménoteknique bachelardienne. Vraiment ? Si clair que ça ? Le temps existe seulement grâce à, et à cause de, nos instruments de mesure ? Est-ce que le temps est uniquement « devenu scientifique dans la mesure où il est devenu technique, où il est accompagné d'une technique de réalisation »⁴⁵ ? Einstein serait très probablement le premier à s'insurger contre une telle conclusion. N'oublions pas que c'est la relativité restreinte

⁴⁰ Bachelard, G., *La formation de l'esprit scientifique*, op. cit., p. 111.

⁴¹ Bachelard, G., *L'engagement rationaliste*, op. cit., p. 148.

⁴² Einstein A., *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, « *Annalen der Physik* », 17, 1905, p. 893.

⁴³ On a donc deux définitions du temps, une locale, donnée par ma montre (aujourd'hui on appelle ça le temps propre) et une non-locale qu'Einstein a appelé « le temps des systèmes stationnaires », aujourd'hui souvent assimilé au temps coordonné.

⁴⁴ Petite boutade. Einstein ne faisait que des expériences de pensée (*Gedankenexperiment*). Est-ce suffisant pour une analyse Bachelardienne ? C'est un autre sujet intéressant, mais qu'on ne traitera pas ici.

⁴⁵ Bachelard, G., *La formation de l'esprit scientifique*, op. cit., p. 61.

qui a unifié le temps et l'espace, dans un ensemble qui peut être vu comme un ensemble géométrique immuable et déterministe "l'univers-bloc", ce qui est très loin de la conception Bachelardienne de phénomènes scientifiques dont l'existence même est sujet d'expérimentation « La Physique n'est plus une science de faits ; elle est une technique d'effets »⁴⁶. A contrario le temps serait donc (avec l'espace) une matrice sur laquelle les effets Bachelardiens se déroulent, car la notion même "d'effet" présuppose un temps (et un lieu) où il se produit ! On voit, par ce petit exemple, que la question du début "Est-ce que le temps peut être sujet de la phénoménotéchnique Bachelardienne ?" et le dilemme associé, faux ou pas, n'a pas de réponse évidente. Mais il est utile, à notre avis, de garder en tête cette question comme grille de lecture de la suite de cet ouvrage.

Conclusion

Relire Bachelard peut nous aider à répondre à ces questions. La troisième période de la philosophie bachelardienne se déploie entre 1949 et 1953. Le *Rationalisme appliqué* (1949), l'*Activité rationaliste de la physique contemporaine* (1951) et le *Matérialisme rationnel* (1953) ressaisissent la dialectique de la science qui s'opère dans son épistémologie et son histoire de façon dispersée selon les régions du savoir. Bachelard identifie un double mouvement du rationalisme appliqué et du matérialisme rationnel qui constituent les deux aspects de l'unique dialectique scientifique – épistémologique et historique – capable d'opérer une synthèse historique entre ce qui semblait auparavant contradictoire. En 1951, Bachelard prononce une conférence sur « L'actualité de l'histoire des sciences »⁴⁷ pour souligner l'action positive des sciences sur notre esprit : au sens propre, les sciences font penser. La philosophie des sciences a pour tâche d'explicitier cette pensée active opérant au cœur de l'activité scientifique. Pour cela, elle doit relire le chemin historique parcouru par les savoirs pour ressaisir le geste scientifique de la négation du passé qui instaure un nouveau savoir opératoire. Or ce processus se poursuit sans cesse et invite à reprendre le projet-même que se donnait Bachelard en incluant désormais la philosophie bachelardienne comme un moment. Pour bien juger le passé, nous devons le dépasser et connaître le présent. Pour bien lire Bachelard, nous ne pouvons-nous contenter d'une lecture internaliste de son œuvre, mais devons la mettre à l'épreuve de son avenir, qui est aussi notre contexte actuel. Autrement dit, poser la question de l'actualité bachelardienne à la lumière des développements scientifiques contemporains ne consiste pas à critiquer Bachelard de façon anachronique, mais à éprouver la pertinence matricielle de ses analyses et de ses concepts à l'aune des sciences contemporains. Pour bien juger du passé, Bachelard y compris, il faut connaître le présent⁴⁸. En 2001, Pariente rappelle que, « La seule

⁴⁶ Bachelard, G., « Noumène et microphysique », op. cit., p. 17-18.

⁴⁷ Bachelard, G., *L'actualité de l'histoire des sciences*, in *L'engagement rationaliste*, op. cit., p. 136-150.

⁴⁸ Ivi, p. 140.

façon d'être fidèle à Bachelard (1884-1962) serait de prolonger son geste en se mettant à la hauteur des derniers développements et des dernières interrogations de la connaissance »⁴⁹. La science ne retourne pas en arrière : ses apparentes ruptures renforcent au contraire la continuité profonde. « L'historien des sciences, tout en cheminant le long d'un passé obscur, doit aider les esprits à prendre conscience de la valeur profondément humaine de la science d'aujourd'hui »⁵⁰. L'histoire apporte une lumière récurrente au sens où elle apprend à repérer les séries récurrentes qui organisent l'histoire du rationalisme entendue comme une fonction qui met en relation notre esprit et le réel⁵¹. Elle juge au moment où elle connaît : elle normalise⁵², dans la mesure où elle embarque nécessairement des jugements, des normes et des valeurs. Ce processus transforme la vérité d'un moment comme un cas particulier d'une théorie plus générale ; l'histoire rectifie sans cesse son passé pour en faire notre présent. Ce double geste de péremption et de sanction exprime notre actualité, au sens d'une évolution de notre esprit scientifique, qui n'est rien d'autre que l'« acte épistémologique » de « la science actuellement active »⁵³. Chaque nouvelle étape permet d'englober le passé récent dans une logique plus globale, et resituer plus nettement le passé lointain selon son avènement imprévisible. Ainsi ce mouvement historique ruine toute prétention à une histoire définitive et impose « un besoin de refaire l'histoire des sciences, un effort pour comprendre en modernisant »⁵⁴.

Ce besoin s'avère d'autant plus urgent que l'histoire des sciences est aussi la nôtre. « Tout va de pair, les concepts et la conceptualisation (...), on peut assurer que la pensée se modifie dans sa forme si elle se modifie dans son objet »⁵⁵. Notre ontologie se joue à travers notre devenir épistémologique et technique. En retraçant le parcours qui mène à notre présent, l'historien nous permet de nous connaître nous-mêmes, de comprendre notre société. L'histoire des sciences est non seulement l'histoire de la culture⁵⁶, mais aussi l'histoire de l'esprit scientifique, notre histoire : « l'histoire des sciences est devenue l'histoire d'une cité scientifique. La cité scientifique, dans la période contemporaine, a une cohérence rationnelle et technique qui écarte tout retour en arrière »⁵⁷. La science s'avère une « puissance de transformation »⁵⁸ ; elle organise notre forme de vie concrète et fait émerger une culture comme un moment de ce que nous sommes.

⁴⁹ Pariente, J.C., *Le vocabulaire de Bachelard*, Paris, Ellipses, 2001, p. 3.

⁵⁰ Bachelard, G., *L'actualité de l'histoire des sciences*, « Revue du palais de la Découverte », 18/173 (1951), p. 150.

⁵¹ Canguilhem a souligné la nécessité d'un bon usage de la récurrence, G. Canguilhem, *Idéologie et Rationalité dans l'histoire des sciences de la vie*, « Etudes d'histoire et de philosophie des sciences », Paris, Vrin, 1988, p.24.

⁵² Bachelard, G., *Le rationalisme appliqué*, Paris, PUF, 1949, p. 59.

⁵³ Bachelard, G., *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1951, p. 25.

⁵⁴ Bachelard, G., *L'actualité de l'histoire des sciences*, op. cit., p. 145.

⁵⁵ Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, [1934] Paris, PUF, 2013, p. 70.

⁵⁶ Bachelard, G., *Le rationalisme appliqué*, Paris, PUF, [1949] 1966, p. 38.

⁵⁷ Bachelard, G., *L'actualité de l'histoire des sciences*, op. cit., p. 150.

⁵⁸ Bachelard, G., *De la nature du rationalisme*, in *L'engagement rationaliste*, op. cit., p. 45.

Ce numéro des Bachelard studies s'inscrit dans la continuité d'un projet de recherche financé par la Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (MITI), par le Labex FIRST TF, la Maison des sciences de l'homme et de l'environnement et l'université de Franche Comté.

Sarah Carvallo
Université Claude Bernard Lyon 1
sarah.carvallo@univ-lyon1.fr

François Vernotte
FEMTO-ST, Université de Franche-Comté
francois.vernotte@femto-st.fr

Peter Wolf
SYRTE, Observatoire de Paris-PSL, CNRS, Sorbonne Université, LNE
peter.wolf@obspm.fr

Éditorial

Références

- Alunni, Ch., *Spectres de Bachelard*, Paris, Hermann, 2019 ;
 Bachelard, G., « Noumène et microphysique », 1931-1932, in : *Études*, Paris, Vrin, 1970, p. 11-24.
 Bachelard, G., *La philosophie du non. Essai d'une philosophie du Nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, 1940 ;
 Bachelard, G., *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, Puf, 1951 ;
 Bachelard, G., *L'actualité de l'histoire des sciences*, « Revue du palais de la Découverte », 18/173, 1951 ;
 Bachelard, G., *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1967 ;
 Bachelard, G., *Le rationalisme appliqué* [1949], Paris, PUF, 1966 ;
 Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique* [1934] Paris, PUF, 2013.
 Bachelard, G., *L'engagement rationaliste*, Paris, PUF, 1972 ;
 Bachelard, G., *La valeur inductive de la relativité* [1929] Paris, Vrin, 2014.
 BIPM et al., *The international vocabulary of metrology – VIM*, 3rd edn, 2012, <http://www.bipm.org/vim> ;
 Bouton, Ch., Huneman, Ph., *Temps de la nature, nature du temps*, Paris, CNRS éditions, 2018 ;
 Bouton, Ch., *Le temps de l'urgence*, Lormont, Le bord de l'eau, Bordeaux, 2013 ;
 Bouton, Ch., *Le futur est-il déjà présent ?* in Bouton, C., Huneman, P., *Temps de la nature, nature du temps. Études philosophiques sur le temps dans les sciences naturelles*, Paris, CNRS éditions, 2018 ;
 Canguilhem, G., *Idéologie et Rationalité dans l'histoire des sciences de la vie*, « Etudes d'histoire et de philosophie des sciences », Paris, Vrin, 1988 ;
 Declos, A. ; Tiercelin, Cl., éd.s. *La métaphysique du temps. Perspectives contemporaines*, Paris, Collège de France, 2021;
 Einstein A., *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, « Annalen der Physik », 17, 1905 ;
 Einstein, A., *Lettre à la famille de Michele Besso* (1955), in Einstein, A., *Œuvres choisies*, t. 5, Seuil, 1991 ;
 Fabry, L., *Phenomenotechnique: Bachelard's Critical Inheritance of Conventionalism*. « Studies in History and Philosophy of Science », Part A, Elsevier, 2019 ;
 Feyerabend, P., *Realism and the historicity of knowledge*, "Journal of Philosophy", 86, 1989, 393-406 ;

- Grange, J., *L'invention technique et théorique : la philosophie des sciences de G. Bachelard. Imaginaire, Industrie et innovation*, Pierre Musso; Centre culturel de Cerisy, Sep 2015, Cerisy-la-Salle, France. pp.90. halshs-01336345 ;
- Hartmut, R., *Accélération. Une critique sociale du temps*, trad. par D. Renault, Paris, La Découverte, 2010 ;
- Lecourt, D., *L'Épistémologie historique de Gaston Bachelard*, Paris, Vrin, 2002 ;
- McTaggart, J.M.E., *The Unreality of Time*, "Mind", vol. 17, pp. 457-73, 1908 ;
- Michelson, A.A. ; Morley, E. W., *On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether*, « American Journal of Science », vol. s3-34, no 203, 1er novembre 1887, p. 333-345 ;
- Minkowski, H., *Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern*, « Nachrichten der k. Gesellschaft der Wissenschaft zu Göttingen », mathematisch-physikalische Klasse, 1908 ;
- Pariente, J.C., *Le vocabulaire de Bachelard*, Paris, Ellipses, 2001 ;
- Rheiberger, H.J., *Gaston Bachelard and the notion of « phénoménotechnique »*, « Perspectives on science », 13/3, 2005, p. 313-328 ;
- Rovelli, C., *Et si le temps n'existait pas ?*, Dunod, 2012 ;
- Vigoureux, J.M., *L'univers en perspective*, Paris, Ellipses, 2006 ;
- Wolff, F., *Le temps du Monde*, Paris, Le Seuil, 2023.