

1-2/2024

Bachelard Studies
Études Bachelardiennes
Studi Bachelardiani



MIMESIS

Bachelard Studies Études Bachelardiennes Studi Bachelardiani

Editors / Directeurs / Direttori

Renato BOCCALI (Università IULM, Milano), Jean-Jacques WUNENBURGER (Université Jean Moulin, Lyon III)

Editor in Chief / Rédactrice en Chef / Capo Redattrice

Aurosa ALISON (Università degli Studi di Napoli l'Orientale)

Deputy Editors in Chief / Rédacteur en Chef adjoints / Vice-Capo redattori

Riccardo BARONTINI (Università di PAU), Jacques POIRIER (Université de Bourgogne), Eileen RIZO PATRON (Binghamton University)

Comité de Rédaction / Editorial Board / Comitato redazionale

Giulia ANDREINI (Università IULM), Ambra BENVENUTO (Università IULM), Claudio D'AURIZIO (Università della Calabria), Annagiulia CANESSO (Università di Padova), Luigi GRISOLIA (Università degli Studi di Milano Statale), Gilles HIERONIMUS (Université Jean Moulin, Lyon III), Gerardo IENNA (Università di Verona), Alessandro MONTEFAMEGLIO (Università Vita-salute San Raffaele), Catarina SANT'ANNA (Universidade Federal da Bahia)

Comité Scientifique / Scientific Board / Comitato scientifico

Charles ALUNNI (École normale supérieure de Paris), Lutz BAUMANN (Johannes Gutenberg-Universität Mainz), Blanca SOLARES ALTAMIRANO (Universidad Nacional Autónoma de México), Maria Francesca BONICALZI (Università degli Studi di Bergamo)

Vincent BONTEMPS (École normale supérieure, CEA, Paris), Ionel BUSE (Universitatea din Craiova), Rodolphe CALIN (Université Paul Valéry, Montpellier III), Sarah CARVALLO (Université Claude Bernard Lyon 1), Mario CASTELLANA (Università del Salento, Lecce), Valeria CHIORE (Università l'Orientale di Napoli), Frédéric FRUTEAU DE LACLOS (Université Paris 1 – Panthéon Sorbonne), Fabio FERREIRA DE ALMEIDA (Universidade Federal de Goiás), Elio FRANZINI (Università degli Studi di Milano), Gabriel KAFURE DA ROCHA (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano), Yanping GAO (Chinese Academy of Sciences, Beijing), Kuan-Min HUANG (Academia Sinica, National Chengchi University, Taiwan), Etienne KLEIN (CEA, Paris), Marie-Pierre LASSUS (Université de Lille), Mercedes MONTORO ARAQUE (Universidad de Granada), Fabrizio PALOMBI (Università della Calabria, Arcavacata di Rende), Daniel PARROCCHIA (Université Jean Moulin Lyon III), Jean-Philippe PIERRON (Université de Bourgogne, Dijon), Marta PLES-BEBEN (Uniwersytet Śląski w Katowicach), Luis PUELLES ROMERO (Universidad de Málaga), Gaspard POLIZZI (Università di Pisa), Delia POPA (Villanova University), Hans-Jörg RHEINBERGER (Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, Berlin), Ana Tais PORTANOVA (Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre), -Roberto REVELLO (Università dell'Insubria), Makoto SEKIMURA (Hiroshima City University), Christian THIBOUTOT (Université du Québec à Montréal), Carlo VINTI (Università degli Studi di Perugia), Anton VYDRA (University of Trnava)

Redazione

bachelardstudies@mimesisjournals.com

This issue was made possible by the support Ce numéro a été réalisé avec le support de Questo numero è stato realizzato con il contributo

Università IULM, Milano

Association Internationale Gaston Bachelard

Mimesis Edizioni (Milano – Udine)

www.mimesisedizioni.it

mimesis@mimesisedizioni.it

Issn: 2724-5470

Isbn: 9791222317328

© 2024 – Mim Edizioni SRL

Piazza Don Enrico Mapelli, 75

20099 Sesto San Giovanni (MI)

Phone: +39 02 24861657 / 24416383

REGISTRO DI STAMPA – TRIBUNALE DI NAPOLI R.G. n. 5571/19

Proprietario: Associazione Italiana Gaston Bachelard

Legale rappresentante: Aurorarosa Alison

Direttore responsabile: Aurorarosa Alison

Autorizzazione n. 34 – del 24/07/2019

Indice

EDITORIAL – ÉDITORIAL – EDITORIALE

- 5 Sarah Carvalho, François Vernotte and Peter Wolf, *The phenomenotechnique of time*
23 Sarah Carvalho, François Vernotte et Peter Wolf, *La phénoménotechnique du temps*
41 Sarah Carvalho, François Vernotte e Peter Wolf, *La fenomenotecnica del tempo*

THE LETTER – LA LETTRE – LA LETTERA

- 61 Gilles Cohen-Tannoudji et Jean-Pierre Gazeau, *Phénoménotechnique du temps et cosmogonie scientifique*
77 Olga Pombo, *Science et école chez Bachelard. Discontinuité et nouveauté*
93 Marie-Pierre Lassus, *Musique quantique et temps ondulant. Pour une théorie ondulatoire de l'alouette*

MIND – L'ESPRIT – LO SPIRITO

- 111 Pierre Martin-Dussaud, *Five surprises about the physics of time*
121 Marc Lachièze Rey, *Effets temporels dans les théories relativistes*
133 Sébastien Bize et Pacome Delva, *La réalisation des références spatio-temporelles*
161 Gianna Panfilò, *Temps universel ou temps international ?*
173 Clément Lacroûte, *De la phénoménotechnique à l'idéologie matérialisée : pourquoi la science fabrique-t-elle le monde ?*

FOR FURTHER READING – POUR ALLER PLUS LOIN – PER ULTERIORI LETTURE

- 191 *Bibliographie générale : La phénoménotechnique du temps*

VARIES – VARIE – VARIA

- 197 Bertrand Nicquevert, *Boson et vérité : donner du sens à la recherche, à l'attention de l'Association internationale Gaston Bachelard*

ARCHIVES – ARCHIVES – ARCHIVI

- 213 Ferdinand Gonseth, *Le problème du temps. Essai sur la méthodologie de la recherche*. Neuchâtel, Editions du Griffon, 1964

RESONANCES – RÉSONANCES – RISONANZE

- 235 François Vernotte – Nice, 10 novembre 2023, *Retranscription de l'entretien avec Noël Dimarcq*

ICONOGRAPHY – ICONOGRAPHIE – ICONOGRAFIA

- 245 Raphaël Dallaporta, *Équation du Temps* (2019-2021)

- 251 **ABSTRACT**

Editorial

The phenomenotechnique of time – Introduction

1. Introduction

After Bachelard, what do we know about time? In the 1930s, Bachelard took on the epistemological and ontological break brought about by Einsteinian physics by proposing a philosophy of the instant. One hundred years after *L'intuition de l'instant* (1932) and *Dialectique de la durée* (1936), have scientific and technological advances preserved, displaced or canceled out the fruitfulness of Bachelard's philosophy of time? Bachelard's historical epistemology¹ requires us to continue our work in the history of science and philosophy, to criticize outdated categories and update the reality of what science thinks today. It differs from other contemporary sociological² or philosophical research that aims to constitute a metaphysics of time and determine the ontological status of the present, the past and the future, or that of duration³ in the continuity of the work of J.M.E. McTaggart (1866-1925), to trace a descriptive metaphysics of temporal modalities⁴, or to account for our temporal experience phenomenologically⁵. Bachelard himself was conscious of choosing a third path between metaphysics and phenomenology: that of historical epistemology, which seeks to understand the negotiated conciliation between knowledge and reality, between rationalism and materialism.

¹ According to the expression coined by Dominique Lecourt in his master's thesis to characterize his philosophy of science in 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., eds. *La métaphysique du temps. Perspectives contemporaines*, Paris, Collège de France, 2021, which includes contributions from leading time researchers: 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, 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. View also Laurent Perreu researches about phenomenology and sociology.

Indeed, philosophers and scientists compare their philosophical, epistemological, scientific and historical analyses to analyze how Bachelard characterized a fundamental evolution in the relationship between science and time that began with Einstein, and to examine the relevance of Bachelardian concepts and theses in the light of contemporary physics and metrology. Questioning the contemporary reality of time extends the work of Bachelard's⁶ readings in the light of our present scientific history. Firstly, science is a phenomenotechnique; secondly, science and its history constitute the fundamental framework for our access to reality; and thirdly, history forces science and philosophy to evolve, forcing the scientific mind to grow and to question the role of science in our societies and our lives.

2. Bachelard, relativity, and time

Gaston Bachelard has a special place in philosophy, and especially in the philosophy of science. Firstly, although his attraction to the humanities was evident throughout his life, his keen interest in the sciences never waned. It was more than just an interest, however keen, for he actually practiced science. At the beginning of the 20th century, with a philosophy baccalaureate in his pocket, he turned to the cutting-edge technology of his time, telegraphy, when he joined the Post and Telegraph Office. At the same time, he prepared for a scientific baccalaureate, followed by postgraduate studies that enabled him to teach physics and chemistry at a secondary school for several years. Bachelard then devoted the first period of his work to understanding contemporary science, what he called its «inductive value», in particular what science teaches us about time by denying Bergsonian duration. The second period began in 1940, when Bachelard began to analyze the historical movement of science, which he conceived as a negation and thematized under the figure of *non*. His dual expertise in science and philosophy made him a privileged witness to the revolutions that overturned physics at the beginning of the 20th century: relativity, on the one hand, and quantum mechanics, on the other. No one understood the radical paradigm shifts that ensued better than he did. His work *Le nouvel esprit scientifique*, published in 1934, testifies both to his astute understanding of modern mathematical and physical theories, and to the depth of his philosophical reflections induced by these theories. It was in this context that he took up his concept of *phenomenotechnique*, defined a few years earlier:⁷

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

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

⁷ Bachelard, G., *Noumène et microphysique*, « Koyré », Puech et Spaier, vol. 1, Paris, Boivin & Cie, 1931-1932, p. 55-65.

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 phénoménotechnique [instruments are merely materialized theories. Phenomena emerge from them, bearing the mark of theory on all sides. The relationship between the scientific phenomenon and the scientific noumenon is no longer a distant and idle dialectic, but an alternative movement which, after some rectification of projects, always tends towards an effective realization of the noumenon. Genuine scientific phenomenology is therefore essentially phenomenotechnics].⁸

In fact, modern physics, and quantum mechanics in particular, confound the Kantian order of transcendental idealism to the point of total confusion: like many other concepts in physics, such as particles and waves, for example, the notions of noumenon and phenomenon are completely intertwined! The philosopher then seeks to understand the negation effected by contemporary science, showing how, thanks to mathematics, it gains access to an abstract rationality totally alien to our ordinary perceptions and intuitions. Substance becomes an overstance or an ex-stance, and reason a power of divergence, which abandons our ordinary intuitions, emancipating itself from habits of thought to induce syntheses capable of reconciling wave and corpuscle in the photon, the eternalism of general relativity (in McTaggart's sense), the entropy of systems and the unreality of time in quantum mechanics in the instant (in Rovelli's sense).

Science knows better, differently and more than we can say and name with our usual words. Language and thought must be converted to express what mathematical physics knows. Mathematical physics offers more than just a precise language to describe things as the Vienna Circle⁹ theorists thematized them: it structures both reality and our minds. Faced with the logicism he criticizes, Bachelard promotes an engineer's style, the one he wanted to be at the start of his professional career in telecommunications. More fundamentally, to know something is not so much to define it, as to know how to make it, first theoretically, then experimentally, even industrially. Thus, techniques are not simply the application of science to act on reality according to our interests and utilities but express the dialectic of knowledge and reality that is being played out historically. They reveal «the new philosophical character of this rationalism and associated realism, both of which are essentially actualized in techniques formulated by mathematical theories»¹⁰. Science induces, in the sense that it produces in a given field, rationality and reality. It knows and acts together: scientific instruments, technical objects, devices and infrastructures express this operative dialectic. As a result, it finds itself obliged first to deny ordinary objects and logics in order to transform them. Certainly, science deals with reality, but it does not describe it as if it pre-existed in a natural world: it determines the reality in which we exist, not only through the instruments, machines and technologies we use, but also through the semantics and grammar according to which we think and say the

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

⁹ Bachelard, G., *Le Nouvel esprit scientifique*, Paris, Librairie Félix Alcan, 1934, p. 53.

¹⁰ Bachelard, G., *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, P.U.F., 1951, p. 2.

real and ourselves¹¹. What science knows and does at a given moment is real. In other words, science realizes its objects, it is phenomenotechnical¹². It no longer targets natural, anhistorical, universal or eternal entities, as Newton or Laplace assumed, but a moment in a long process of transformation of our minds and of reality. By the same token, technique is not a related, accessory or secondary activity of science, but expresses the fabricating function of reason. «Un concept est devenu scientifique dans la proportion où il est devenu technique, où il est accompagné d'une technique de réalisation [A concept has become scientific insofar as it has become technical, insofar as it is accompanied by a technique of realization]»¹³. Bachelard's scientific realism does not mean constructivism or relativism in the sociological sense of David Bloor's «strong program»: it means historical realism, which traces the noumenal function that realizes the noumenon as a phenomenon. This noumenal function acts like electromagnetic induction: by linking phenomena of distinct fields, it produces a mixed real effect. Scientific experience becomes a phenomenal synthesis, a new kind of schematism capable of history, evolution and novelty, precisely insofar as the categories of understanding evolve and transform. In this way, science gives rise to a continuous, indefinite creation that reconfigures our history and ourselves. The mathematical thinking of science, allied to contemporary technologies, constitutes a dialectic of creation or construction that organizes phenomenotechnical devices. Bachelard calls this second nature realized by human reason a *natura constructa*: it is not reduced to reproducing, copying or resembling nature, but produces phenomena by reorganizing and renewing reality¹⁴. This second nature breaks with common sense and practical concerns in that it realizes noumena made possible by mathematics, which now organizes the real and the rational. Our minds must then rise to the level of contemporary science, in a constantly renewed effort: «En somme la science instruit la raison. *La raison doit obéir à la science, à la science la plus évoluée, à la science évoluant* [In short, science instructs reason. Reason must obey science, the most advanced science, evolving science]»¹⁵. The scientific history of time thus tells the story of the making of time, in the sense that time progressively determines several figures of scientific objectivity, which constitute our temporal reality at different historical epochs: reversible and absolute in classical mechanics, then irreversible and entropic in thermodynamics,

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

¹² Bachelard, G., *Noumène et microphysique*, « Études » [1970] p. 19 ; Bachelard, G., *La formation de l'esprit scientifique* [1934], 5^e édition 1967, p. 71. View also 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., *Phenomenotechnique : 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* [1934], 5^e édition 1967, p. 71.

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

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

devoid of absolute simultaneity in special relativity, differentiated into space-time unfolding in an eternalistic block universe, or perhaps purely local in the spatiotemporal sense.

Capturing the dialectics at work in regional sciences calls for a «philosophie dispersée»¹⁶ that can be applied to each region, while accepting to do away with the beautiful a priori unity of the absolute time of Newtonian science. For a physicist of time, nothing better illustrates this phenomenotechnique than the evolution of the definition of the unit of time, the second, over the course of the twentieth century. In the first half of the century, this definition was based on the Earth's rotation, i.e. the length of the day: the second is the 1/86400th part of the average solar day¹⁷. To paraphrase Augustine, time is that noumenon of which we have a theoretical intuition without yet fully grasping it, whereas the length of the day is the experimental phenomenon that we can observe and measure precisely. But everything changed with the invention of the Cesium atomic jet clock and, above all, with the adoption of the atomic second in 1967, whose definition becomes totally abstruse to the non-physicist: The second is the duration of 9, 192, 631, 770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the Cesium 133 atom at rest, at the temperature of absolute zero¹⁸. So, to measure time, we use the experimental phenomenon of the atomic clock, which involves cesium atoms which, like all atoms, have energy levels defined by their atomic structure, i.e. the principal quantum number, the orbital, the magnetic moment and spin of each of their electrons, and can therefore change energy level by absorbing or emitting a photon whose frequency confers an energy, according to Planck's relation, exactly equal to the difference between two energy levels of the atom! And it's precisely this frequency observable in the case of an atomic clock that may be considered as a new time reference...

To do this, you need to master and have confidence in quantum theory, that highly mathematized and, to say the least, astonishing intellectual construct, in order to highlight the experimental phenomenon on which you're going to rely. Where is the noumenon? What is the phenomenon? To go beyond Bachelard's quote above, you could even say that an atomic clock smacks of theory! It's a world away from the pendulum of a mechanical clock, whose oscillations are a purely experimental phenomenon...

The other scientific revolution of the twentieth century, relativity, is less puzzling from an epistemological point of view, in that it does not directly attack the very foundations of physics, and hence the realism cherished by physicists. It does, however, shake up our conception of space and time. In *La valeur inductive de la relativité*, published in 1929, Bachelard demonstrates his exhaustive understanding of both the tensor mathematical formalism required to

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

¹⁷ A day is divided into 24 hours of 60 minutes of 60 seconds: $24 \times 60 \times 60 = 86400$ seconds per day.

¹⁸ Report of the 13th CGPM (1967), 1969, p. 103.

develop general relativity and its implications for space and time. Indeed, relativity takes us into a world where time ceases to be absolute, since it depends on the frame of reference in which we are situated; the notion of simultaneity becomes an arbitrary convention; space and time merge to form space-time; this space-time is no longer the container and the universe the content, but they interact to such an extent that they become inseparable. What's more, Bachelard doesn't fall into the many traps that relativity sets for common sense, particularly the very notion of relativity itself. He rightly wrote: «La relativité est une doctrine de l'absolu [relativity is a doctrine of the absolute]»¹⁹ turning his back on a number of thinkers who believed it to be a powerful argument for philosophical relativism!

3. The physics and metaphysics of time

Newton believed that space and time formed a single framework within which the universe evolved. As we have just seen, Einstein's vision of the world was radically different. Based on two postulates shared by all physicists today, namely (1) Galilean relativity and (2) the constancy of the speed of light in any frame of reference²⁰, he demonstrated through a simple thought experiment that time cannot be absolute²¹. To do this, he first gives a definition of synchronicity: let's imagine two distinct points A and B , motionless in our frame of reference. We place a clock in the immediate vicinity of each of these two points. We'll assume that these two clocks are perfectly identical. A light beam is sent from A to B , reflected at B and returned to A . We note t_A on clock A , the instant when the beam first passes through A , t_B on clock B the instant when the beam passes through B and t'_A on clock A the instant when the beam returns to A . For Einstein, the clocks at A and B are synchronous if $t_B - t_A = t'_A - t_B$.

Now let's imagine that points A and B are the ends of a rigid rod moving in uniform rectilinear translation at speed v relative to our frame of reference and in the direction of AB . An observer, moving with the rod, measures time using clocks at rest in our frame of reference, which are identical, perfectly synchronized and distributed along the entire trajectory of the bar. Observing the back and forth movement of the light beam between points A and B , the observer will note :

$$\begin{aligned} t_B - t_A &= \overline{AB}/(c-v) \\ &\text{and} \\ t'_A - t_B &= \overline{AB}/(c+v) \end{aligned}$$

¹⁹ Bachelard, G., *La valeur inductive de la relativité*, op. cit.

²⁰ This postulate began to appear at the beginning of the 20th century following the Michelson-Morley experiment (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, November 1, 1887, p. 333-345.

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

where c is the speed of light. As Einstein put it, «*we must not attribute an absolute meaning to the notion of simultaneity, and two events which are simultaneous seen from a certain reference frame, can no longer be considered as simultaneous events, seen from a system in motion with respect to this frame of reference*»²². So, if two observers are in motion relative to each other, they will not date the events they witness at the same time. There isn't just one time for the whole universe, but an infinite number, attached to an infinite number of different frames of reference. Consequently, two events that are simultaneous in one frame of reference will generally not be so in another.

This conception of time, although repeatedly verified by experiments using atomic clocks, has nothing to do with our experience of time. It seems legitimate to ask what's happening right now in another part of the world, or even in another part of the universe, in the Andromeda galaxy, for example. Yet, contrary to all expectations, such a question does not necessarily admit of a single, precise answer. It depends not only on the relative speeds of our two galaxies, but also on completely arbitrary conventions. To illustrate this point, let's look at a representation of relativistic space-time devised by mathematician and theoretical physicist Hermann Minkowski²³ following Einstein's publication on special relativity²⁴. Figure 1 shows such a diagram, in which space has been restricted to x (transverse horizontal axis) and y (longitudinal horizontal axis) dimensions. The z dimension has been omitted to show the time axis, noted ct (vertical axis), where c , the celerity of light, gives this time dimension a magnitude equivalent to a distance, as for the x and y dimensions. This type of diagram, commonly referred to as a light cone, has the particularity of explicitly representing the past (bottom), the present (the grey hypersurface, which in this case is a surface since we've removed the Oz axis) and the future (top). It can also be used to represent the trajectories of all light beams passing through O at time $t=0$: this is the cone shown in blue in Fig. 1. Since a photon travels at the speed of light, it covers a distance $d=ct$, which corresponds to the equation for the surface of the cone. Since no massive body can reach the speed of light, the trajectory of

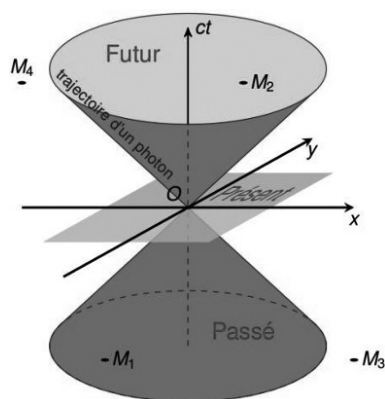


Figure 1: Example of a Minkowski diagram. Only 2 of the 3 dimensions of space (Ox and Oy directions) are represented to allow the time axis to be represented vertically. For reasons of dimensional homogeneity, the time t has been multiplied by the speed of light c .

²² *Ibidem*, p. 897.

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*.

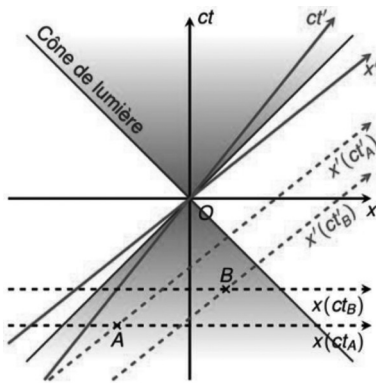


Figure 2: Minkowsky diagram reduced to one dimension of space and one dimension of time.

any massive body passing through point O at $t=0$ can only lie inside the cone of light. On the other hand, all points outside the cone of light correspond to the position of bodies that will not pass through O , if they are in the past (e.g. M_3), or that have not passed through O , if they are in the future (e.g. M_4). Since nothing moves faster than the speed of light, not even the interactions of the 4 forces of physics (gravitational, electromagnetic, weak interaction, strong interaction), points outside the light cone can't have had any causal influence on O if they're in the past, or can't have been causally influenced by O if they're in the future. On the other hand, points in O 's past light cone (e.g. M_1) may have causally influenced O , and points in O 's future light cone (e.g. M_2) may have been causally influenced by O . The advantage of using this type of diagram lies mainly in the study of causal relationships between events. To simplify the problem, we'll consider only one dimension of space, which we'll denote x , and the dimension of time ct . Let's imagine we're stationary at point O at time $t=0$ (see Figure 2). Since we're not moving in the x direction, our trajectory in Minkowski spacetime will follow the ct direction. We'll be «carried away» by time along the vertical axis. The other axis, following the x -direction, corresponds to all points that are also at $t=0$, in other words, our present (in reality, a 3D hyperplane in 4-dimensional space-time). Now let's imagine a passer-by moving at constant speed from left to right, crossing us at time $t=0$ (the red line labeled ct' in Figure 2). The trajectory of the passer-by who crosses us at O is called his universe line. The other line (the red straight line labeled x' in Figure 2, which in reality is also a 3D hypersurface in 4-dimensional space-time)²⁵ contains all the points simultaneous with the passer-by at a given instant. Now imagine a passer-by moving at constant speed from left to right, crossing us at time $t=0$ (red line labeled ct' on figure 2). The trajectory of the passer-by who crosses us at O is called his universe line. The other line (the red straight line labeled x' in Figure 2, which in reality is also a 3D hypersurface in 4-dimensional space-time) contains all the points simultaneous with the passer-by at a given instant. So, in our 2-dimensional space-time, the hypersurfaces of the present are reduced to two straight lines, one horizontal for our own present, the other inclined for that of the passer-by. This representation of the world shows that one person's present is not another's present, and that the separation between past and

²⁵ This hyperplane of simultaneity, which appears naturally when using the formulae for changing reference frames known as the Lorentz equations, is the result of an implicit choice made by Einstein. Although this choice is by far the most convenient, other conventions exist in special relativity. Nevertheless, this does not change the reasoning below.

future is not as universal as we think! Indeed, the chronological order of events may not be the same in two different frames of reference (like events A and B in figure 2, where $t_B > t_A$ but $t'_B < t'_A$).

How, then, can we continue to adhere to the presentism that considers that only the present is, that the past is no more, and that the future is not yet? This is a crucial question, since it is precisely this conception of the world that underpins our behavior. If the past has created the present, and the present conditions the future, then we are comforted in our habit of choosing the actions we need to take in order to prepare the future that seems best to us. On the other hand, the illusory nature of the present and of the distinction between past and future forces us to seriously consider the opposite thesis to presentism, *eternalism*, a doctrine according to which 4D space-time would be frozen in a «block universe», where each frame of reference would only generate a contingent orientation of the axis of time and therefore of the hypersurface of the present. In this case, not only would the past-present-future sequence be an illusion, a kind of perspective effect²⁶, but so would our free will! As early as the beginning of the 20th century, the English philosopher McTaggart questioned the veracity of the passage of time²⁷, just three years after the publication of Einstein's seminal article on special relativity²⁸. Yet this article does not appear to have had any direct influence on McTaggart's thinking. Nevertheless, the controversy over the metaphysics of time provoked by Einstein's article provided the context. Indeed, using completely different arguments, McTaggart also concluded that time was unreal. These two concurrent approaches not only collide head-on with our intimate conception of time, but also run counter to well-established principles in physics such as causality and the arrow of time induced by the concept of entropy in thermodynamics. If time has no real existence, how could it have any sense of flow!

Causality, as Bouton²⁹ has shown, is not, however, opposed to relativity, at least not in its restricted sense. Indeed, as we showed above, it is perfectly possible to observe chronological inversions between two particular events A and B by changing the frame of reference from which they are observed; this is, moreover, the main justification for the block universe. On the other hand, we can demonstrate that the situation is quite different when we consider causally linked events in the context of special relativity. To do this, we first need to introduce the relational operator «*is prior to*» symbolized by $<$. Thus $A < B$ means that event A is prior to event B in the causal sense, i.e. that A could (the conditional is important) be the cause of B . As a corollary, it follows that B must be within the cone of light of A , otherwise the influence of A on B would have to propagate at a speed greater than that of light, which is forbidden by the theory of relativity. The novelty lies

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.*

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.

in the impossibility of finding a frame of reference for which $B < A$, or even $A \nless B$, if there is a reference frame for which $A < B$. Causality is therefore conserved in special relativity. The problem becomes more complicated in general relativity but, although certain exotic topologies could theoretically lead to causality inversions, their realistic nature remains under debate. In any case, no violation of causality has yet been observed.

Causality therefore remains a valid principle as long as it has not been contradicted! Consequently, even if it is favored by a number of physicists, including Einstein, who wrote shortly before his death: «*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* [For us physicists at heart, the distinction between past, present and future is no more than an illusion, however tenacious it may be]»³⁰, the block universe is still not inevitable and there is still room for free will.

4. Do scientists make time?

The present of a frame of reference could well be one hypersurface of space-time among others, thus casting doubt on the physical reality of one of the meanings of what we are used to thinking of as time, but the fact remains that the physical quantity that we measure with our clocks and that we also call, perhaps by misuse of language, time, is the quantity measured with the greatest precision³¹ and by far the greatest. But what exactly are we measuring? As Bachelard showed with his concept of phenomenotechnique, theory and experience are closely intertwined. So, what does an atomic clock measure? According to Einstein, time is what a clock measures³². But if we define a clock as the instrument that measures time, we are faced with two circular definitions, and we are no further ahead either on the nature of time or on what a clock measures! However, physicists are realistic enough to regard the measurement given by clocks as the best approximation to the «true time of physics» which, locally, would be unique in the frame of reference under consideration, continuous and flowing in a perfectly regular manner. However, physicists are aware of the contradictions between these properties. Everything would be fine in an empty universe governed by special relativity, but our real world is material, so we have to use general relativity and add the term «locally» to all the properties set out above. This adverb considerably reduces the idea of true time! In the age of optical clocks, it is possible to detect differences in the passage of time between two clocks whose altitude differs by just ten centimetres or so. The global reference

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

³¹ Time metrologists are wary of using the term 'precision', which they consider to be too... imprecise! They prefer better-defined concepts such as *accuracy* and *stability* (see 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, September, 26, 1905, p. 893.

time scale established by the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), which is still referred to as «universal» (UTC: Coordinated *Universal* Time), is therefore valid only on a surface surrounding the Earth whose gravitational potential is constant and whose altitude is arbitrarily chosen to be 0. This reference surface corresponds to what is commonly known as sea level. Any difference in altitude in relation to this reference must be known to at least 1 cm. The 450 atomic clocks involved in calculating UTC must therefore send their precise altitude in addition to the local time they indicate. The BIPM then corrects the local time of each of these clocks to bring it down to the level of altitude 0 and takes a weighted average to form UTC³³.

Each month, the BIPM publishes «Circular T», which gives the difference in 5-day steps between the time given by each of the clocks and UTC for the past month (see <https://www.bipm.org/fr/time-ftp/circular-t>). So, although it is totally compatible with general relativity, the official definition of time is based on several assertions whose arbitrary nature we tend to forget, such as: time is the quantity measured by atomic clocks or the flow of time is perfectly continuous.

However, we are not sure of any of these alleged properties. In fact, the time seen by certain micro-physicists, in particular the time of loop quantum gravitation, has nothing to do with this idealized time, just as space does not. It is neither unique, regular nor continuous. There is even talk of «spin foam»³⁴ which, with the addition of the causality ingredient, could lead to «space-time foam»³⁵. There is undoubtedly as much of a gap between so-called continuous time and this foam of time as there is between the notion of particles imagined as little marbles at the end of the nineteenth century and the wave function model in their quantum conception. Finally, quantum cosmology also imposes a «Planck time»:

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

where \hbar represents the reduced Planck constant, G the constant of universal gravitation and c the speed of light.

According to some authors, this t_p could constitute the quantum of time. We would then be in a stroboscopic world in which each discrete time step would run out t_p after t_p . The vision of the physicists interpolating the time of the clocks to make a perfectly continuous time could thus well appear naive even if we are not ready to approach time intervals of the order of 10^{-43} s; we are, in the best of the

³³ The calculation of UTC is a little more complicated: the mean time of these clocks is called the Échelle Atomique Libre (EAL); EAL is then corrected using frequency standards so that the flow of time conforms to the definition of the second: this is International Atomic Time (TAI); UTC corresponds to TAI increased periodically by leap seconds so that it does not deviate from the time given by the rotation of the earth (UT: Universal Time) by more than 0.9 seconds. A full explanation can be found on the BIPM website: https://www.bipm.org/documents/20126/59466374/6_establishment_TAR20.pdf/.

³⁴ Rovelli, C., *Et si le temps n'existait pas?*, Dunod, 2012, p. 128.

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

cases at the attosecond (10^{-18} s), that is to say a gap of a factor 10^{25} to fill: as much as between an attosecond and a century!

To come back to UTC, it is indeed an idealisation of time in the Platonic sense of the term. Yet it is this idealized time that society implicitly adopts, and which is considered by all to be the indisputable reference for time. It is the scientific time par excellence, whose veracity seems above suspicion. Have we, the metrologists of time, not become the manufacturers of time? With our atomic clocks, are we perhaps manufacturing a time that the whole of humanity adopts, even if it does not conform to reality? This is an important question when we consider the role that time measurement has taken on in society, whether explicit (telecommunications, transport, finance, energy, etc.) or implicit (positioning, space, etc.). Are we responsible for all the excesses that would have been impossible without such a mastery of time: high-frequency trading, 'surgical' missile strikes, etc.?

So, what about time: is it a quantity that exists by itself and that we can, at best, only measure, as the realist physicist thinks, who considers UTC to be the best approximation of real time? Or is UTC, which is a pure creation of metrologists, only valid among metrologists, in accordance with a certain relativistic approach (in the epistemological sense and not the Einsteinian sense). What if, rather than deciding between these two extreme positions, we turned instead to Bachelard's phenomenotechnique?

In a Bachelardian context, the question could then be rephrased as follows: can time be the subject of Bachelardian phenomenotechnique? If the answer is 'yes', then we have a false dilemma, because scientific phenomena are provoked by experience, by a technique of realization³⁶: «*La phénoménoteknikue 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 [Phenomenotechnique extends phenomenology. A concept has become scientific insofar as it has become technical, insofar as it is accompanied by a technique of realization]*»³⁷. At the same time, these same scientific phenomena have a noumenic dimension, a mathematical structure derived from the mind of the experimenter: «*Le microscope est un prolongement de l'esprit plutôt que de l'œil [The microscope is an extension of the mind rather than of the eye]*»³⁸. So, it wouldn't be «to know or to make time», but «to know and to make time», so there's no dilemma. But is the answer really 'yes'? Is time really phenomenotechnical? We're not going to decide. In a way, that is the subject of the third part of this book, and it would be presumptuous to try to short-circuit it with a simple 'yes' or 'no'. At best, this question can serve as a useful thread for the reader as he or she examines the various contributions that follow, in the hope that by the end he or she will have a slightly deeper and more diversified insight into this problematic, if not necessarily a clearer one for all that.

³⁶ This contribution is inspired, in part, by: 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*, 1ère éd. 1934a, Vrin, 1967, p. 61.

³⁸ *Ibidem*, p. 242.

To guide us, the Bachelardian dialectic between the noumenon, the mathematical theory, and the experimental phenomenon, can shed light on our understanding of time. The scientific phenomenon arises from the dialectic between the mind and the technique of realization:

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.

[It seems to us that this strong, indispensable link between theory and technique should be expressed as a very special human determinism, as an epistemological determinism that was hardly perceptible a few centuries ago in the separation of mathematical and experimental cultures]³⁹.

The experimenter does not simply observe the facts, he conditions them by his approach. Guided by theoretical and abstract concepts, they invent experiments and build instruments that contribute to the emergence of scientific phenomena. This is what enables us to structure the world: «Le véritable ordre de la Nature c'est l'ordre que nous mettons techniquement dans la Nature [The true order of Nature is the order that we technically put into Nature]»⁴⁰. Not just in the scientific laboratory, but far beyond that, in nature itself. And in doing so, it is the experimenter himself who renews himself: «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 [Noumenal experimentation in the laboratory continues on a large scale and in the open air. This surpassing of Nature is also the mutation of man]»⁴¹. Let's apply this thought to a particular example: Einstein tells us at the beginning of his 1905 paper «It seems possible that all the difficulties concerning the definition of 'time' could be overcome by replacing 'time' by 'the position of the little hand of my watch'»⁴². He goes on to point out that while such a definition is sufficient as long as we are interested in events that take place only at the place where my watch is, it is no longer sufficient when we need to link together distant events, i.e. in most practical cases, such as the statement: «*a kilonova was observed by the VISTA telescope at Cerro Paranal (Chile) and a gravitational wave signal at the Virgo detector (Pisa) at the same time*». So, what does 'at the same time' mean in this case? For such cases, Einstein developed a mathematical and physical construction that operationally defined simultaneity and therefore synchronisation of distant clocks. He thus defines a 'time' beyond my watch⁴³. Note that Einstein's definition is not unique to relativity; other definitions exist and are commonly used, for example for the time scales we use every

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

⁴⁰ Bachelard, G., *La Formation de l'esprit scientifique*, 1ère éd. 1934a, Vrin, 1967, p. 111.

⁴¹ Bachelard, G., *L'Engagement rationaliste*, PUF, 1972, p. 148.

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

⁴³ We therefore have two definitions of time, a local one, given by my watch (today it is called proper time) and a non-local one that Einstein called «the time of stationary systems», today often equated with coordinated time.

day, such as Coordinated Universal Time (UTC). But let's attempt a phenomenotechnical analysis of Einstein's 'time'. First, we note the emergence of this time from a technological instrument constructed by the experimenter ('my watch', from the pendulum to the atomic clock). But to this we must add the theory, the mind of the experimenter (Einstein in this case⁴⁴) who builds a whole mathematical and operational construction to end up with a satisfactory 'time'. These two aspects are perfectly in line with Bachelard's phenomenotechnical thinking. It therefore seems clear that time in special relativity is fully subject to Bachelardian phenomenotechnique. But is it? That clear? Does time only exist thanks to, and because of, our measuring instruments? Has time only «become scientific insofar as it has become technical, insofar as it is accompanied by a technique of realization»⁴⁵? Einstein would probably be the first to take exception to such a conclusion. Let's not forget that it was special relativity that unified time and space into a whole that can be seen as an immutable and deterministic geometric whole, the «block universe», which is a long way from Bachelard's conception of scientific phenomena whose very existence is subject to experimentation: «La science est moins une science des faits que d'effets [Science is less a science of facts than of effects]»⁴⁶. On the other hand, time (along with space) would be a matrix on which Bachelardian effects unfold, because the very notion of «effect» presupposes a time (and a place) in which it occurs! This little example shows that there is no obvious answer to the opening question «Can time be the subject of Bachelardian phenomenotechnique?» and the associated dilemma of whether or not it is true. But it is useful, in our opinion, to keep this question in mind as a grid for reading the rest of this book.

Conclusion

Rereading Bachelard can help us answer these questions. The third period of Bachelardian philosophy unfolds between 1949 and 1953. *Rationalisme appliqué* (1949), *l'Activité rationaliste de la physique contemporaine* (1951) and *Matérialisme rationnel* (1953) capture the dialectic of science as it operates in its epistemology and history in a dispersed way according to the regions of knowledge. Bachelard identifies a dual movement of applied rationalism and rational materialism, which constitute the two aspects of a single scientific dialectic – epistemological and historical – capable of bringing about a historical synthesis between what had previously seemed contradictory. In 1951, Bachelard gave a lecture on *L'actualité de l'histoire des sciences*⁴⁷ to emphasize the positive effect

⁴⁴ A little joke. Einstein only did thought experiments (Gedankenexperiment). Is that enough for a Bachelardian analysis? That's another interesting subject, but we won't go into it here.

⁴⁵ Bachelard, G., *La Formation de l'esprit scientifique*, 1ère éd. 1934a, Vrin, 1967, p. 61.

⁴⁶ Bachelard, G., *Noumène et microphysique*, « Études », p. 11-24 also in *Recherches philosophiques*, 1931, p. 551-565.

⁴⁷ Bachelard, G., *L'actualité de l'histoire des sciences*, in *L'engagement rationaliste*, Paris, PUF, 1972, p. 136-150.

of science on our minds: in the truest sense of the word, science makes us think. The task of the philosophy of science is to make explicit this active thinking at the heart of scientific activity. To do this, it has to reread the historical path taken by knowledge in order to grasp the scientific gesture of negating the past and establishing new operational knowledge. This process continues unabated and invites us to return to Bachelard's own project by including Bachelardian philosophy as a moment in time. To judge the past properly, we need to go beyond it and get to know the present. To read Bachelard properly, we cannot be satisfied with an internalist reading of his work but must put it to the test of his future, which is also our present context. In other words, posing the question of Bachelard's actuality in the light of contemporary scientific developments does not mean criticising Bachelard anachronistically, but testing the matrix relevance of his analyses and concepts against the yardstick of contemporary science. To judge the past properly, including Bachelard, you need to know the present⁴⁸. In 2001, Pariente reminded us that, «La seule 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 [The only way to be faithful to Bachelard (1884-1962) would be to continue his work by keeping up with the latest developments and questions in knowledge]»⁴⁹. Science does not go backwards: on the contrary, its apparent ruptures reinforce its profound continuity. «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 [The historian of science, while following the path of an obscure past, must help people to become aware of the profoundly human value of today's science]»⁵⁰. History sheds recurrent light⁵¹ in the sense that it teaches us to spot the recurring series that organize the history of rationalism, understood as a function that brings our minds into relation with reality⁵². It judges when it knows: it normalizes⁵³, insofar as it necessarily embeds judgements, norms and values. This process transforms the truth of one moment into a particular case of a more general theory; history constantly rectifies its past to make it our present. This double gesture of expiry and sanction expresses our actuality, in the sense of an evolution of our scientific spirit, which is nothing other than the «epistemological act» of «currently active science»⁵⁴. Each new stage makes it possible to encompass the recent past in a more global

⁴⁸ Ivi, p. 140.

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 Bachelard, G., *L'actualité de l'histoire des sciences*, «Revue du palais de la Découverte», 18/173 (1951), p. 141.

⁵² Canguilhem stressed the need to make good use of recurrence, G. Canguilhem, *Idéologie et Rationalité dans l'histoire des sciences de la vie*, «Etudes d'histoire et de philosophie des sciences», p.24.

⁵³ Bachelard, G., *Le Rationalisme appliqué*, Paris, Puf, 1949, p. 59.

⁵⁴ Bachelard, G., *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, Puf, 1951, p. 25.

logic, and to situate the distant past more clearly according to its unforeseeable advent. This historical movement thus undermines any claim to a definitive history and imposes «a need to remake the history of science, an effort to understand by modernizing»⁵⁵.

This need is even more urgent in that the history of science is also our history. «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 [Everything goes hand in hand, concepts and conceptualisation (...), we can be sure that thought changes its form if it changes its object]»⁵⁶. Our ontology is at stake in our epistemological and technical future. By tracing the path that leads to our present, the historian enables us to understand ourselves and our society. The history of science is not only the history of culture⁵⁷, but also the history of the scientific spirit, our history: «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 [the history of science has become the history of a scientific city. In the contemporary period, the scientific city has a rational and technical coherence that precludes any turning back]»⁵⁸. Science proves to be a «power of transformation»⁵⁹; it organizes our concrete form of life and gives rise to a culture as a moment of what we are.

This issue of Bachelard studies is a continuation of a research project funded by the Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (MITI), the Labex FIRST TF, the Maison des sciences de l'homme et de l'environnement and the 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

⁵⁵ Ivi, p. 145.

⁵⁶ Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique* [1934] 1968, Paris, PUF, p. 44.

⁵⁷ Bachelard, G., *Le rationalisme appliqué* [1949], Paris, PUF, 1966, p. 38

⁵⁸ Bachelard, G., *L'actualité de l'histoire des sciences*, in « L'engagement rationaliste », Paris, PUF, 1972, p. 150.

⁵⁹ Bachelard, G., *De la nature du rationalisme*, in *L'engagement rationaliste*, Paris, PUF, 1972, p. 45.

References

- Alunni, Ch., *Spectres de Bachelard*, Paris, Hermann, 2019 ;
- Bachelard, G., *Noumène et microphysique*, « Études », p. 11-24 also published in *Recherches philosophiques*, 1931 ;
- Bachelard, G., *Noumène et microphysique*, « Koyré », Puech et Spaier, vol. 1, Paris, Boivin & Cie, 1931-1932 ;
- Bachelard, G., *Le Nouvel esprit scientifique*, Paris, Librairie Félix Alcan, 1934 ;
- 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*, 1ère éd. 1934a, Vrin, 1967 ;
- Bachelard, G., *Le rationalisme appliqué* [1949], Paris, PUF, 1966 ;
- Bachelard, G., *La formation de l'esprit scientifique* [1934], 5^e édition 1967 ;
- Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique* [1934] Paris, PUF, 1968 ;
- Bachelard, G., *Noumène et microphysique*, « Études » [1970] ;
- Bachelard, G., *L'Engagement rationaliste*, PUF, 1972 ;
- Bachelard, G., *De la nature du rationalisme*, in *L'engagement rationaliste*, Paris, PUF, 1972 ;
- Bachelard, G., *L'engagement rationaliste*, Paris, PUF, 1972 ;
- Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, PUF, 8^{me} édition, 2013 ;
- 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, 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 » ;
- Declos, A. ; Tiercelin, Cl., eds. *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, November 1, 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.

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.

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 *phénoménotechnique* 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 phénoménotechnique.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 le 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 phénoménoteknique 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.

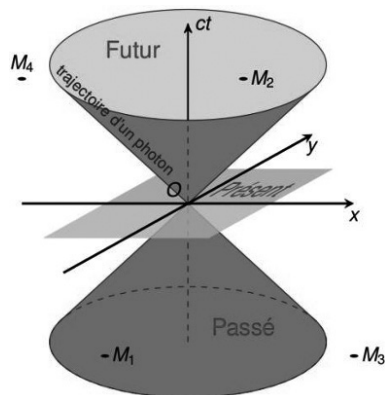


Figure 1: Exemple de diagramme de Minkowski. Seules 2 des 3 dimensions d'espace (directions Ox et Oy) sont représentées pour permettre de représenter l'axe des temps verticalement. Pour des raisons d'homogénéité des dimensions, le temps t a été multiplié par la vitesse de la lumière c .

²² *Ibidem*, p. 897.

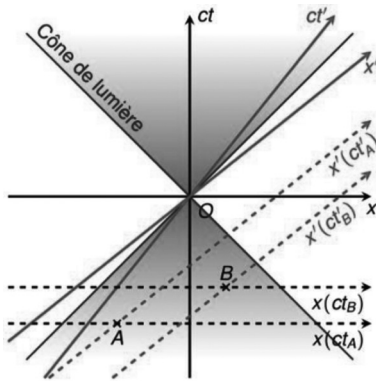


Figure 2: Diagramme de Minkowsky réduit à une dimension d'espace et la dimension de temps.

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

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

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*.

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'éternelisme, 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 $<$. Ainsi $A < B$ 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 $B < A$, ou même $A \nless B$, s'il existe un référentiel pour lequel $A < B$. 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 détecter 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 phénoménoteknik 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 phénoménoteknik 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 phénoménoteknik 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 phénoménoteknik ? 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 phénoménotechnique 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 Carvalho
Université Claude Bernard Lyon 1
sarah.carvalho@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., eds. *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.

Editoriale

La fenomenotecnica del tempo – Introduzione

1. Introduzione

Dopo Bachelard, che sappiamo sul tempo? Intorno al 1930, Bachelard affronta la rottura epistemologica e ontologica provocata dalla fisica einsteiniana proponendo una filosofia dell'istante. Cento anni dopo *L'intuition de l'instant* (1932) e *Dialectique de la durée* (1936), i progressi scientifici e tecnologici conservano, soppiantano o annullano la fecondità della filosofia del tempo di Bachelard¹? L'epistemologia storica praticata da Bachelard ci impone di continuare il lavoro della storia della scienza e della filosofia per criticare categorie superate e attualizzare la realtà che la scienza pensa oggi distinguendosi da altre ricerche sociologiche² o filosofiche contemporanee che mirano a costituire una metafisica del tempo e a determinare lo statuto ontologico del presente, del passato e del futuro o quello della durata³ in continuità con J.M.E. McTaggart (1866-1925), tracciando una metafisica descrittiva delle modalità temporali⁴ e rendendo conto della nostra esperienza temporale fenomenologicamente⁵. Bachelard era consapevole di aver scelto una terza via tra metafisica e fenomenologia: quella dell'epistemologia storica, che cerca di comprendere una riconciliazione tra conoscenza e realtà, tra razionalismo e materialismo.

¹ Secondo l'espressione coniata da Dominique Lecourt nella sua tesi di master per caratterizzare la sua filosofia della scienza nel 1969, *L'epistemologia di Gaston Bachelard*, tr. it. di R. Lanza, M. Magni, Milano, JacaBook, 1997.

² Harmut, R., *Accelerazione e alienazione: Per una teoria critica del tempo nella tarda modernità*, tr. it. di Leonzio, E., Torino, Einaudi, 2015.

³ Declos, A. ; Tiercelin, Cl., eds. *La métaphysique du temps. Perspectives contemporaines*, Paris, Collège de France, 2021. Con i contributi i ricercatori sul tempo Baptiste Le Bihan, Vincent Grandjean, Philippe Huneman, Robin Le Poidevin. Sullo stesso argomento : 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, 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. Si vedano anche le ricerche di Laurent Perreau tra fenomenologia e sociologia.

In effetti, filosofi e scienziati mettono a confronto le loro analisi filosofiche, epistemologiche, scientifiche e storiche per analizzare il modo in cui Bachelard è stato in grado di caratterizzare un'evoluzione fondamentale nel rapporto tra scienza e tempo, iniziata con Einstein, esaminando la rilevanza dei concetti e delle tesi bachelardiane alla luce della fisica e della metrologia contemporanee. Interrogarsi sulla realtà contemporanea del tempo è un prolungamento delle riletture di Bachelard⁶ alla luce della nostra attuale storia scientifica. Questo lavoro si inserisce in un triplice quadro teorico secondo cui: in primo luogo, la scienza una fenomenotecnica; in secondo luogo, la scienza e la sua storia sono il quadro fondamentale per il nostro accesso alla realtà; infine, la storia costringe la scienza e la filosofia a evolversi, obbliga la mente scientifica a crescere e a mettere in discussione il ruolo della scienza nelle nostre società e nelle nostre vite.

2. Bachelard, la relatività e il tempo

Gaston Bachelard occupa un posto speciale nella filosofia, in particolare nella filosofia della scienza. Sebbene la sua attrazione per le discipline umanistiche sia stata evidente per tutta la vita, il suo vivo interesse per le scienze non è mai venuto meno. Anzi, si trattava di qualcosa di più di un semplice interesse, seppur appassionato, poiché egli praticava effettivamente la scienza. All'inizio del XX secolo, con la laurea in filosofia in tasca, si dedicò a una tecnologia d'avanguardia del suo tempo, la telegrafia, lavorando all'Ufficio Poste e Telegrafi. Allo stesso tempo, si preparò per la maturità scientifica e poi per l'istruzione superiore che gli permise di diventare insegnante di fisica e chimica in una scuola secondaria. Bachelard dedicò il primo periodo del suo lavoro a comprendere la scienza contemporanea, al suo «valore induttivo», in particolare a ciò che la scienza ci insegna sul tempo negando la durata bergsoniana. Il secondo periodo si apre nel 1940, quando Bachelard comincia ad analizzare il movimento storico della scienza, che concepisce come una negazione e tematizza sotto la figura del non. La sua duplice competenza scientifica e filosofica lo rendeva testimone privilegiato delle rivoluzioni che stavano sconvolgendo la fisica all'inizio del XX secolo: la relatività, da un lato, e la meccanica quantistica, dall'altro. Nessuno meglio di lui ha compreso i radicali cambiamenti di paradigma che ne sono derivati. Il suo libro *Le nouvel esprit scientifique*, pubblicato in Francia nel 1934, è un ottimo esempio della sua comprensione delle teorie moderne della matematica e della fisica, nonché della profondità delle sue riflessioni filosofiche a riguardo. È qui che riprende il suo concetto di *fenomenotecnica*, definito qualche anno prima⁷:

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

⁷ Bachelard, G., *Noumène et microphysique*, tr.it. di M. Chiappini, *La ragione scientifica*, Bertani, Verona 1974, pp. 218-225 [*Noumène et microphysique*, « Koyré », Puech et Spaier, vol. 1, Paris, Boivin & Cie, 1931-1932, p. 55-65].

gli strumenti non sono che teorie materializzate. Ne vengon fuori fenomeni che portano in ogni parte il marchio teorico. Tra il fenomeno scientifico e il noumeno scientifico, non si tratta più, dunque, di una dialettica lontana e oziosa, ma d'un movimento alternato che, dopo talune rettifiche dei progetti, tende sempre a una realizzazione effettiva del noumeno. Perciò la vera fenomenologia scientifica è dunque essenzialmente, una fenomenotecnica.⁸

In effetti, la fisica moderna, e la meccanica quantistica in particolare, arrivano a confondere il fine ordine kantiano dell'idealismo trascendentale: come molti altri concetti della fisica, quali ad esempio particelle e onde, le nozioni di noumeno e fenomeno sono completamente intrecciate! Il filosofo cerca allora di comprendere la negazione operata dalla scienza contemporanea mostrando come, grazie alla matematica, essa acceda a una razionalità astratta del tutto estranea alle nostre percezioni e intuizioni ordinarie. La sostanza diventa una sovra-stanza o una ex-stanza, e la ragione un potere di divergenza, che abbandona le nostre intuizioni ordinarie, emancipandosi dalle abitudini di pensiero per indurre sintesi capaci di conciliare onda e corpuscolo nel fotone, l'eterno della relatività generale (nel senso di McTaggart), l'entropia dei sistemi e l'irrealtà del tempo nella meccanica quantistica nell'istante (nel senso di Rovelli).

La scienza conosce meglio, diversamente e più di quanto possiamo dire con le nostre parole abituali. Il linguaggio e il pensiero devono essere convertiti per esprimere ciò che la fisica matematica sanno. Questo non solo offre un linguaggio precisoper descrivere le cose nel modo in cui lo facevano i teorici del Circolo di Vienna⁹: strutturando la realtà e la nostra mente. Di fronte al criticato logicismo, Bachelard promuoveva uno stile da ingegnere, ciò che voleva diventare all'inizio della sua carriera professionale nelle telecomunicazioni: fondamentalmente, conoscere qualcosa non è tanto definirla quanto saperla realizzare, prima teorica-mente, poi sperimentalmente o addirittura industrialmente. In questo modo, la tecnologia non può essere ridotta a un'applicazione delle scienze per agire sulla realtà secondo interesse o utilità, ma esprime proprio la dialettica tra conoscenza e realtà che si sta giocando storicamente. Esse rivelano un «carattere filosofico nuovo di questa associazione di razionalismo e di realismo, l'uno e l'altro attualizzati essenzialmente nelle tecniche formulate dalle teorie matematiche»¹⁰. La scienza induce, nel senso che produce in un determinato campo, razionalità e realtà. Conosce e agisce insieme: strumenti scientifici, oggetti tecnici, dispositivi e infrastrutture esprimono questa dialettica operativa. Di conseguenza, si trova costretta prima a negare gli oggetti e le logiche ordinarie per trasformarle. Certo, la scienza si occupa della realtà, ma non la descrive come se preesistesse in un mondo naturale: determina la realtà in cui esistiamo, non solo attraverso gli strumenti, le macchine e le tecnologie che usiamo, ma anche attraverso

⁸ Bachelard, G., *Il nuovo spirito scientifico*, tr. it. di L. Geymonat, P. Redondi, Bari, Laterza, 1978, p. 61 [*Le nouvel esprit scientifique*, PUF, 2013, pp. 16-17].

⁹ Bachelard, G., *Il nuovo spirito scientifico*, op. cit., p. 50 [*Le nouvel esprit scientifique*, op. cit.].

¹⁰ Bachelard, G., *L'attività razionalista della fisica contemporanea*, tr. it. di C. Maggioni, Milano, JacaBook, 2020, p. 27. [*L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1951, p. 2].

la semantica e la grammatica secondo cui pensiamo e diciamo la realtà e noi stessi¹¹. Ciò che la scienza sa e fa in un dato momento è reale. In altre parole, la scienza realizza i suoi oggetti, è fenomenotecnica¹². Non si rivolge più a entità naturali, antistoriche, universali o eterne, come supponevano Newton o Laplace, ma a un momento di un lungo processo di trasformazione delle nostre menti e della realtà. Allo stesso modo, la tecnologia non è un'attività correlata, accessoria o secondaria della scienza, ma un'espressione della funzione creativa della ragione. «Un concetto diventa scientifico nella misura in cui diventa tecnico, o viene accompagnato da una tecnica di realizzazione»¹³. Il realismo scientifico di Bachelard non significa costruttivismo o relativismo nel senso sociologico del «programma forte» di David Bloor: significa realismo storico, che rintraccia la funzione noumenale che realizza il noumeno come fenomeno. Questa funzione noumenale agisce come l'induzione elettromagnetica: collegando fenomeni di campi distinti, produce un effetto reale misto. L'esperienza scientifica diventa una sintesi fenomenica, un nuovo tipo di schematismo capace di storia, evoluzione e novità, proprio nella misura in cui le categorie di comprensione evolvono e si trasformano. In questo modo, la scienza dà luogo a una creazione continua e indefinita che riconfigura la nostra storia e noi stessi.

Il pensiero matematico della scienza, combinato con le tecnologie contemporanee, costituisce una dialettica di creazione o costruzione che organizza i dispositivi fenomenotecnici. Bachelard chiama questa seconda natura realizzata dalla ragione umana *natura constructa*: questa non si riduce a riprodurre, copiare o assomigliare alla natura, ma produce fenomeni riorganizzando e rinnovando la realtà¹⁴. Questa seconda natura rompe con il senso comune e le preoccupazioni pratiche in quanto crea noumeni resi possibili dalla matematica che organizza il reale e il razionale. La nostra mente deve quindi elevarsi al livello della scienza contemporanea in uno sforzo sempre rinnovato: «insomma, la scienza istruisce la ragione. *La ragione deve obbedire alla scienza, alla scienza più evoluta, alla scienza che evolve*»¹⁵. La storia scientifica del tempo racconta dunque la storia del farsi del tempo, nel senso che

¹¹ Feyerabend, P., *Il realismo scientifico e l'autorità della scienza*, tr. it. di Artosi, A., Milano, Il Saggiatore, 1983 [*Realism and the historicity of knowledge*, "Journal of Philosophy", 86, 1989, 393-406].

¹² Bachelard, G., *Noumène et microphysique*, « Études » [1970] p. 19 ; Bachelard, G., *La formazione dello spirito scientifico*, tr. it. di E. Castelli Gattinara, Milano, Cortina, 1996 [*La formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1967]. Si vedano anche 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 formazione dello spirito scientifico*, op. cit., p. 71 [*La formation de l'esprit scientifique*, op. cit., p. 71].

¹⁴ Bachelard, G., *L'impegno razionalista*, tr. it. di E. Sergio, Milano, JacaBook, 2003 [*L'engagement rationaliste*, Paris, PUF, 1972, p. 50].

¹⁵ Bachelard, G., *La filosofia del non*, tr. it. di A. Vio, Catania, Pellicanolibri, 1978, p.137 [*La philosophie du non. Essai d'une philosophie du Nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, 1940, p. 144].

il tempo determina progressivamente diverse figure di oggettività scientifica, che costituiscono la nostra realtà temporale in diversi periodi storici: reversibile e assoluta nella meccanica classica, poi irreversibile ed entropica nella termodinamica, priva di simultaneità assoluta nella relatività speciale, differenziata nello spazio-tempo che si dispiega in un universo a blocchi eterno, o forse puramente locale in senso spaziotemporale. Cogliere la dialettica in atto nelle scienze regionali richiede una «philosophie dispersée»¹⁶ capace di essere applicata a ciascuna regione accettando di sbarazzarsi della bella unità a priori del tempo assoluto della scienza newtoniana. Per un fisico del tempo, nulla illustra meglio questa fenomenotecnica dell'evoluzione della definizione dell'unità di tempo, il secondo, nel corso del XX secolo. Nella prima metà di questo secolo, questa definizione si basava sulla rotazione terrestre, cioè sulla durata del giorno: il secondo è la parte 1/86400 di un giorno solare medio¹⁷. Il tempo è quindi quel noumeno di cui abbiamo un'intuizione teorica senza però coglierlo appieno, parafrasando Agostino, mentre la durata del giorno è il fenomeno sperimentale che possiamo osservare e misurare con precisione. Ma tutto è cambiato con l'invenzione dell'orologio atomico al cesio e, soprattutto, con l'adozione nel 1967 del secondo atomico, la cui definizione è diventata totalmente astrusa per i non fisici: il secondo è la durata di 9.192.631.770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133 a riposo, alla temperatura dello zero assoluto¹⁸. Per misurare il tempo, quindi, si utilizza il fenomeno sperimentale creato dall'orologio atomico, che coinvolge atomi di cesio che, come tutti gli atomi, hanno livelli energetici definiti dalla loro struttura atomica, cioè dal numero quantico principale, l'orbitale, il momento magnetico e lo spin di ciascuno dei loro elettroni, e possono quindi cambiare livello energetico assorbendo o emettendo un fotone la cui frequenza conferisce un'energia, secondo la relazione di Planck, esattamente pari alla differenza tra due livelli energetici dell'atomo! Ed è proprio questa frequenza che osserviamo nel caso di un orologio atomico che considereremo come il nostro nuovo riferimento temporale...

In altre parole, bisogna prima padroneggiare e avere fiducia nella teoria quantistica, questo costrutto intellettuale altamente matematizzato e, a dir poco, sorprendente, per poter individuare il fenomeno sperimentale su cui ci si baserà. Dov'è il noumeno? Qual è il fenomeno? Per andare oltre la citazione di Bachelard, si potrebbe addirittura dire che un orologio atomico sa di teoria! È un mondo a parte rispetto al pendolo di un orologio meccanico, le cui oscillazioni sono un fenomeno puramente sperimentale...

L'altra rivoluzione scientifica del XX secolo, la relatività, è meno sconcertante dal punto di vista epistemologico, in quanto non attacca direttamente i fondamenti stessi della fisica e quindi il realismo caro ai fisici. Tuttavia, mette in discussione la nostra concezione dello spazio e del tempo. Nel suo libro *La valeur inductive*

¹⁶ Bachelard, G., *La filosofia del non*, op. cit., p.137 [*La philosophie du non*, op. cit., p. 50].

¹⁷ Un giorno è diviso in 24 ore di 60 minuti di 60 secondi: $24 \times 60 \times 60 = 86400$ secondi al giorno.

¹⁸ Verbale del 13° CGPM (1967), 1969, p. 103.

de la relativité, pubblicato nel 1929, Bachelard dimostra di padroneggiare sia il formalismo matematico tensoriale necessario per sviluppare la relatività generale sia consapevolezza delle sue implicazioni per lo spazio e il tempo. La relatività ci porta infatti in un mondo in cui il tempo cessa di essere assoluto, poiché dipende dal quadro di riferimento in cui ci troviamo; la nozione di simultaneità diventa una convenzione arbitraria; lo spazio e il tempo si fondono per formare lo spazio-tempo; questo spazio-tempo non è più il contenitore e l'universo il contenuto, ma interagiscono a tal punto da diventare inseparabili. Inoltre, Bachelard non cade nelle numerose trappole che la relatività tende al senso comune, in particolare alla nozione stessa di relatività. Egli scrisse giustamente che «la relatività è una dottrina dell'assoluto»¹⁹, voltando così le spalle a numerosi pensatori che ritenevano che essa avrebbe fornito un potente argomento per giustificare il relativismo filosofico!

3. Fisica e metafisica del tempo

Newton credeva che lo spazio e il tempo formassero un'unica struttura all'interno della quale si evolveva l'universo. Come abbiamo appena visto, Einstein ha portato una visione del mondo radicalmente diversa. Sulla base di due postulati oggi condivisi da tutti i fisici, ossia (1) la relatività galileiana e (2) la costanza della velocità della luce in qualsiasi quadro di riferimento²⁰, egli dimostrò con un esperimento di pensiero molto semplice che il tempo non può essere assoluto²¹. Per farlo, dà innanzitutto una definizione di sincronicità: immaginiamo due punti distinti A e B , immobili nel nostro quadro di riferimento. Poniamo un orologio nelle immediate vicinanze di ciascuno di questi due punti. Assumiamo che questi due orologi siano perfettamente identici. Un fascio di luce viene inviato da A a B , viene riflesso in B e ritorna in A . Il momento in cui il raggio attraversa A è dato come t_A sull'orologio A , il momento in cui il raggio attraversa B è dato come t_B sull'orologio B e il momento in cui il raggio ritorna ad A è dato come t'_A sull'orologio A . Per Einstein, gli orologi di A e B sono sincroni se $t_B - t_A = t'_A - t_B$.

Immaginiamo ora che i punti A e B siano le estremità di una barra rigida che si muove in una traslazione rettilinea uniforme con velocità v rispetto al nostro quadro di riferimento e nella direzione di AB . Un osservatore, che si muove con la barra, misura il tempo utilizzando orologi a riposo nel nostro quadro di riferimento, che sono identici, perfettamente sincronizzati e distribuiti lungo l'intera traiettoria della barra.

¹⁹ Bachelard, G., *Il valore induttivo della relatività*, tr. it. di A. Alison, Milano, Mimesis, 2022 [*La valeur inductive de la relativité*, Paris, Vrin, 2014].

²⁰ Questo postulato è apparso all'inizio del XX secolo in seguito all'esperimento 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, 1 novembre 1887, p. 333-345).

²¹ Einstein, A., *Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento* in *Opere scelte*, tr. It. di E. Bellone, Torino, Bollati Boringhieri, 1988, pp. 148-177 [*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, « Annalen der Physik », vol. 322, n° 10, 26 settembre 1905, pp. 891-92].

Osservando il raggio di luce che viaggia avanti e indietro tra i punti A e B in queste condizioni, l'osservatore noterà:

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

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

dove c è la velocità della luce. Come disse Einstein, «non possiamo attribuire al concetto di simultaneità alcun significato *assoluto*, ma che invece due eventi che, considerati in un sistema di coordinate, sono simultanei, se considerati da un sistema che si muove relativamente a questo sistema, non si possono più assumere come simultanei»²². Quindi, se due osservatori si muovono l'uno rispetto all'altro, non daranno gli eventi di cui sono testimoni nello stesso momento. Non esiste quindi un solo tempo per l'intero universo, ma un numero infinito di tempi, collegati a un numero infinito di quadri di riferimento diversi. Di conseguenza, due eventi che sono simultanei in un quadro di riferimento generalmente non lo saranno in un altro.

Questa concezione del tempo, sebbene ripetutamente verificata da esperimenti con orologi atomici, non ha nulla a che vedere con la nostra esperienza del tempo. Sembra legittimo chiedersi cosa stia accadendo ora in un altro punto del globo, o addirittura in un'altra parte dell'universo, ad esempio nella galassia di Andromeda. Contrariamente a tutte le aspettative, questa domanda non ha necessariamente una risposta unica e precisa. Dipende non solo dalle velocità relative delle nostre due galassie, ma anche da convenzioni del tutto arbitrarie.

Per illustrare questo punto, esaminiamo una rappresentazione dello spazio-tempo relativistico ideata dal matematico e fisico teorico Hermann Minkowski²³ dopo la pubblicazione della relatività speciale di Einstein²⁴. La Figura 1 mostra un diagramma di questo tipo, in cui lo spazio è stato limitato alle dimensioni x (asse orizzontale trasversale) e y (asse orizzontale longitudinale). La dimensione z è stata omessa per mostrare l'asse del tempo, indicato con ct (asse verticale), dove c , la velocità della luce, conferisce a questa dimensione temporale una grandezza equivalente a una distanza, come per le dimensioni x e y . Questo tipo di diagramma, comunemente noto come cono di luce, è unico in quanto rappresenta esplicitamente il passato (in basso), il presente (l'ipersuperficie grigia, che in questo caso è una superficie perché abbiamo rimosso l'asse Oz) e il futuro (in alto). Può anche essere utilizzato per rappresentare le traiettorie di tutti i raggi luminosi che passano per O al tempo $t=0$: si tratta del cono mostrato in blu nella figura 1. Poiché un fotone viaggia alla velocità della luce, copre una distanza $d=ct$, che corrisponde all'equazione della superficie del cono. Poiché nessun

²² *Ibidem*.

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*.

corpo massivo può raggiungere la velocità della luce, la traiettoria di qualsiasi corpo massivo che passa per il punto O a $t=0$ può essere trovata solo all'interno del cono di luce. D'altra parte, tutti i punti al di fuori del cono di luce corrispondono alle posizioni di corpi che non passeranno per O se si trovano nel passato (per esempio M_3), o che non sono passati per O se si trovano nel futuro (per esempio M_4). Poiché nulla si muove più velocemente della velocità della luce, nemmeno le interazioni delle 4 forze fisiche (gravitazionale, elettromagnetica, interazione debole, interazione forte), i punti situati al di fuori del cono di luce non possono aver avuto alcuna influenza causale su O se si trovano nel passato, né possono essere stati influenzati causalmente da O se si trovano nel futuro. D'altra parte, i punti del cono di luce passato di O (ad esempio M_1) possono aver influenzato causalmente O e i punti del cono di luce futuro di O (ad esempio M_2) possono essere stati influenzati causalmente da O . Il vantaggio dell'utilizzo di questo tipo di diagramma risiede principalmente nello studio delle relazioni causali tra eventi.

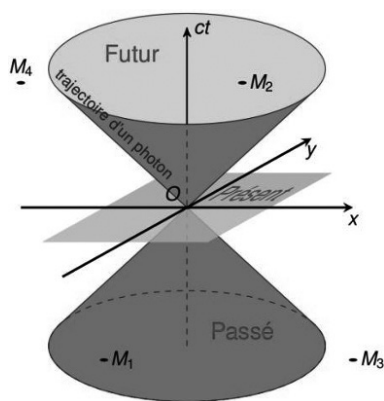


Figura 1. Esempio di diagramma di Minkowski. Sono rappresentate solo 2 delle 3 dimensioni dello spazio (direzioni Ox e Oy) per consentire la rappresentazione verticale dell'asse del tempo. Per ragioni di omogeneità dimensionale, il tempo t è stato moltiplicato per la velocità della luce.

spaziotempo a 4 dimensioni) contiene tutti i punti in un determinato momento.

Così, nel nostro spazio-tempo bidimensionale, le ipersuperfici del presente si riducono a due linee rette, una orizzontale per il nostro presente, l'altra inclinata

Per semplificare il problema, considereremo solo una dimensione dello spazio, che indicheremo con x , e la dimensione del tempo ct . Immaginiamo di essere fermi nel punto O al tempo $t=0$ (vedi Figura 2). Poiché non ci muoviamo nella direzione x , la nostra traiettoria nello spaziotempo di Minkowski seguirà la direzione ct . In un certo senso, saremo «trasportati» dal tempo lungo l'asse verticale. L'altro asse, che segue la direzione x , corrisponde a tutti i punti che si trovano anch'essi a $t=0$, in altre parole il nostro presente (in realtà sarebbe un iperpiano 3D in uno spaziotempo a 4 dimensioni²⁵). Immaginiamo ora un passante che si muove a velocità costante da sinistra a destra e che ci passa davanti al tempo $t=0$ (la linea rossa etichettata ct' nella Figura 2). La traiettoria del passante che ci passa davanti a O è chiamata la sua linea di universo. L'altra linea (la retta rossa etichettata x' nella figura 2, che in realtà è anche un'ipersuperficie 3D in uno

²⁵ Questo iperpiano di simultaneità, che appare naturalmente quando si utilizzano le formule per il cambiamento dei quadri di riferimento note come equazioni di Lorentz, è in realtà il risultato di una scelta implicita di Einstein. Sebbene questa scelta sia di gran lunga la più conveniente, nella relatività speciale esistono altre convenzioni. Ciò non cambia il ragionamento che segue.

per il passante. Questa rappresentazione del mondo mostra che il presente di una persona non è il presente dell'altro e che la separazione tra passato e futuro non è così universale come pensiamo! Infatti, l'ordine cronologico degli eventi può non essere lo stesso in due diversi quadri di riferimento (come gli eventi A e B della figura 2, dove $t_B > t_A$ ma $t'_B < t'_A$).

Come possiamo, in queste condizioni, continuare ad aderire al presentismo che considera che solo il presente è, che il passato non è più e che il futuro non è ancora? È una domanda cruciale, perché è proprio questa concezione del mondo che sta alla base del nostro comportamento. Se è il passato che ha creato il presente e il presente che condiziona il futuro, siamo confortati dall'abitudine di scegliere le azioni da compiere per preparare il futuro che ci sembra migliore.

D'altra parte, la natura illusoria del presente e della distinzione tra passato e futuro ci costringe a prendere in seria considerazione la tesi opposta al presentismo, l'*eternalismo*, una dottrina secondo la quale lo spazio-tempo 4D sarebbe congelato in un «universo a blocchi», dove ogni quadro di riferimento genererebbe solo un orientamento contingente dell'asse del tempo e quindi dell'ipersuperficie del presente. In questo caso, non solo la sequenza passato-presente-futuro non sarebbe altro che un'illusione, una sorta di effetto prospettiva²⁶, ma anche il nostro libero arbitrio! Già all'inizio del XX secolo, il filosofo inglese McTaggart mise in dubbio la veridicità dello scorrere del tempo²⁷, appena tre anni dopo la pubblicazione del testo di Einstein sulla relatività, un testo che non sembra aver avuto un'influenza diretta sul pensiero di McTaggart sebbene la controversia sulla metafisica del tempo provocata dall'articolo di Einstein ne sia il contesto²⁸. Utilizzando argomenti completamente diversi, anche McTaggart concluse che il tempo non era reale. Questi due approcci concomitanti, oltre a scontrarsi con la nostra concezione intima del tempo, si scontrano anche con principi fisici consolidati come la causalità e la freccia del tempo indotta dal concetto di entropia nella termodinamica. Se il tempo non ha un'esistenza reale, come potrebbe avere un senso di flusso?

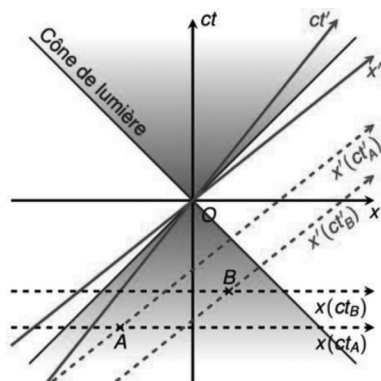


Figura 2. Diagramma di Minkowsky ridotto a una dimensione dello spazio e a una dimensione del tempo.

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

²⁷ McTaggart, J.M.E., *L'irrealità del tempo*, tr. it. di L. Cimmino, Milano, Rizzoli, 2006 [*The Unreality of Time*, "Mind", vol. 17, pp. 457-73, 1908].

²⁸ A. Einstein, *ibid.*

La causalità, come ha mostrato Bouton²⁹, non si oppone però alla relatività, almeno non in senso ristretto. Infatti, come abbiamo mostrato in precedenza, è perfettamente possibile osservare inversioni cronologiche tra due particolari eventi A e B cambiando il quadro di riferimento da cui vengono osservati; questa è, inoltre, la principale giustificazione dell'universo a blocchi. D'altra parte, possiamo dimostrare che la situazione è molto diversa quando consideriamo eventi causalmente collegati nel contesto della relatività speciale. Per fare ciò, dobbiamo innanzitutto introdurre l'operatore relazionale «è precedente a», simboleggiato da \prec . Quindi $A \prec B$ significa che l'evento A è antecedente all'evento B in senso causale, cioè che A potrebbe (il condizionale è importante) essere la causa di B . Come corollario, ne consegue che B deve trovarsi all'interno del cono di luce di A , altrimenti l'influenza di A su B dovrebbe propagarsi a una velocità superiore a quella della luce, cosa vietata dalla teoria della relatività. La novità sta nell'impossibilità di trovare un quadro di riferimento per cui $B \prec A$, o anche $A \nprec B$, se esiste un quadro di riferimento per cui $A \prec B$. La causalità è quindi conservata nella relatività speciale. Il problema diventa più complicato nella relatività generale ma, sebbene alcune topologie esotiche potrebbero teoricamente portare a inversioni di causalità, la loro natura realistica rimane oggetto di dibattito. In ogni caso, non è stata ancora osservata alcuna violazione della causalità. La causalità rimane un principio valido finché non viene contraddetto. Di conseguenza, anche se è sostenuta da alcuni fisici, tra cui Einstein, che poco prima di morire scrisse: «Per noi, fisici nel cuore, la distinzione tra passato, presente e futuro conserva solo il valore di un'illusione, per quanto tenace possa essere»³⁰, l'universo a blocchi non è ancora inevitabile e c'è ancora spazio per il libero arbitrio.

4. Gli scienziati «fanno» il tempo?

Il presente di un quadro di riferimento potrebbe anche essere un'ipersuperficie dello spazio-tempo tra le altre, mettendo così in dubbio la realtà fisica di uno dei significati di ciò che siamo abituati a pensare come tempo, ma resta il fatto che la grandezza fisica che misuriamo con i nostri orologi e che chiamiamo anche, forse per un uso improprio del linguaggio, tempo, è la grandezza misurata con la massima precisione³¹ e da molto lontano. Ma cosa stiamo misurando esattamente? Come ha mostrato Bachelard con il suo concetto di fenomenotecnica, teoria ed esperienza

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 *Corrispondenza con Michele Besso (1903-1955)*, tr. it. di G. Gembillo, Napoli, Guida, 1995, p. 671 [*Œuvres choisies*, t. 5, Seuil, 1991, p. 119].

³¹ I metrologi del tempo sono diffidenti nell'usare il termine «precisione», che considerano troppo... impreciso! Preferiscono concetti meglio definiti come *accuratezza* e *stabilità* (si veda BIPM et al., *The international vocabulary of metrology – VIM*, 3rd edn, 2012, <http://www.bipm.org/vim>).

sono strettamente intrecciate. Cosa misura dunque un orologio atomico? Secondo Einstein, il tempo è ciò che un orologio misura³². Ma se definiamo un orologio come lo strumento che misura il tempo, ci troviamo di fronte a due definizioni circolari, e non siamo più avanti né sulla natura del tempo né su ciò che un orologio misura! Tuttavia, i fisici sono abbastanza realisti da considerare la misura fornita dagli orologi come la migliore approssimazione al «vero tempo della fisica» che, localmente, sarebbe unico nel quadro di riferimento considerato, continuo e scorrevole in modo perfettamente regolare. Tuttavia, i fisici sono ben consapevoli delle contraddizioni tra queste proprietà. Tutto andrebbe bene in un universo vuoto governato dalla relatività speciale, ma il nostro mondo reale è materiale; quindi, dobbiamo usare la relatività generale e aggiungere il termine «localmente» a tutte le proprietà di cui sopra. Questo avverbio riduce notevolmente l'idea di tempo reale! Nell'era degli orologi ottici, è possibile rilevare differenze nello scorrere del tempo tra due orologi la cui altitudine differisce di appena dieci centimetri o poco più. La scala temporale di riferimento globale stabilita dal Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), ancora oggi definita «universale» (UTC: Coordinated *Universal* Time), è quindi valida solo su una superficie circostante la Terra il cui potenziale gravitazionale è costante e la cui altitudine è arbitrariamente scelta pari a 0. Questa superficie di riferimento corrisponde a quello che è comunemente noto come livello del mare. Qualsiasi differenza di altitudine rispetto a questo riferimento deve essere nota con almeno 1 cm. I 450 orologi atomici coinvolti nel calcolo dell'UTC devono quindi inviare la loro altitudine precisa oltre all'ora locale che indicano³³. Il BIPM corregge quindi l'ora locale di ciascuno di questi orologi per riportarla al livello di altitudine 0 e ne fa una media ponderata per formare l'UTC.

Ogni mese, il BIPM pubblica la «Circolare T», che fornisce la differenza in passi di 5 giorni tra l'ora data da ciascuno degli orologi e l'UTC per il mese passato (vedi <https://www.bipm.org/fr/time-ftp/circular-t/>). Quindi, sebbene sia totalmente compatibile con la relatività generale, la definizione ufficiale di tempo si basa su diverse asserzioni di cui tendiamo a dimenticare la natura arbitraria, come ad esempio: il tempo è la quantità misurata dagli orologi atomici 1. il flusso del tempo è perfettamente continuo.

Tuttavia, non siamo sicuri di nessuna di queste presunte proprietà. Infatti, il tempo visto da alcuni microfisici, in particolare il tempo della gravitazione quantistica a loop, non ha nulla a che fare con questo tempo idealizzato, così come non lo ha lo spazio. Non è né unico, né regolare, né continuo. Si parla addirittura di «mousse de spin»³⁴ che, con l'aggiunta dell'ingrediente della causalità, potrebbe

³² Einstein, A., *ibidem*.

³³ Il calcolo dell'UTC è un po' più complicato: il tempo medio di questi orologi è chiamato Échelle Atomique Libre (EAL); l'EAL viene poi corretto utilizzando standard di frequenza in modo che il flusso del tempo sia conforme alla definizione del secondo: questo è il Tempo Atomico Internazionale (TAI); l'UTC corrisponde al TAI aumentato periodicamente di secondi bisestili in modo che non si discosti dal tempo dato dalla rotazione della terra (UT: Tempo Universale) di più di 0,9 s. Una spiegazione completa è disponibile sul sito web del BIPM: https://www.bipm.org/documents/20126/59466374/6_establishment_TAR20.pdf.

³⁴ Rovelli, C., *Che cos'è il tempo? Che cos'è lo spazio?*, Roma, Di Renzo, 2014.

portare a un «écume d'espace-temps»³⁵. Tra il cosiddetto tempo continuo e questa schiuma di tempo c'è indubbiamente un divario pari a quello che c'è tra la nozione di particelle immaginate come piccole biglie alla fine del XIX secolo e il modello della funzione d'onda nella sua concezione quantistica. Infine, la cosmologia quantistica impone anche un «tempo di Planck»:

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

dove \hbar rappresenta la costante ridotta di Planck, G la costante gravitazionale universale e c la velocità della luce.

Secondo alcuni autori, questo t_p potrebbe costituire il quanto di tempo. Ci troveremmo quindi in un mondo stroboscopico in cui ogni passo temporale discreto si esaurirebbe tP dopo tP . La visione dei fisici che interpolano il tempo degli orologi per realizzare un tempo perfettamente continuo potrebbe quindi sembrare ingenua, anche se non stiamo per avvicinarci a intervalli di tempo dell'ordine di 10^{-43} ; siamo, al massimo, all'atosecondo (10^{-18}), un divario di un fattore 10^{25} da colmare: quanto tra un atosecondo e un secolo!

Per tornare all'UTC, si tratta effettivamente di un'idealizzazione del tempo nel senso platonico del termine. È quindi questo tempo idealizzato che la società adotta implicitamente e che è considerato da tutti come il riferimento temporale indiscutibile. È il tempo scientifico per eccellenza, la cui veridicità sembra al di sopra di ogni sospetto. Non è che noi, metrologi del tempo, siamo diventati produttori di tempo? Con i nostri orologi atomici, stiamo forse fabbricando un tempo che l'intera umanità adotta, anche se non è conforme alla realtà? È una domanda importante se consideriamo il ruolo che la misurazione del tempo ha assunto nella società, sia esplicito (telecomunicazioni, trasporti, finanza, energia, ecc.) sia implicito (posizionamento, spazio, ecc.). Siamo responsabili di tutti gli eccessi che sarebbero stati impossibili senza questa padronanza del tempo: trading ad alta frequenza, attacchi missilistici «chirurgici», ecc.

E allora il tempo: è una grandezza che esiste di per sé e che possiamo, al massimo, solo misurare, come pensa il fisico realista che ritiene che l'UTC sia la migliore approssimazione del tempo reale? Oppure l'UTC, che è una pura creazione dei metrologi, è valido solo tra metrologi, secondo un certo approccio relativistico (in senso epistemologico e non einsteiniano). E se, invece di decidere tra queste due posizioni estreme, ci rivolgessimo alla fenomenotecnica di Bachelard?

In un contesto bachelardiano, la domanda potrebbe essere riformulata come segue: il tempo può essere oggetto della fenomenotecnica bachelardiana? Se la risposta è «sì», allora siamo di fronte a un falso dilemma, perché i fenomeni scientifici sono provocati dall'esperienza, da una tecnica di realizzazione³⁶ «la fenome-

³⁵ Lachière-Rey, M., op. cit., p. 377.

³⁶ Questo contributo si ispira in parte a: 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.

notecnica estende la fenomenologia. Un concetto diventa scientifico nella misura in cui diventa tecnico, o viene accompagnato da una tecnica di realizzazione»³⁷. Allo stesso tempo, questi stessi fenomeni scientifici hanno una dimensione noumenica, una struttura matematica derivata dalla mente dello sperimentatore: “*Il microscopio è un'estensione della mente piuttosto che dell'occhio*”³⁸. Quindi non si tratterebbe di “conoscere o fare il tempo”, ma di “conoscere e fare il tempo”, quindi non c'è dilemma. Ma la risposta è davvero “sì”? Il tempo è davvero fenomenotecnico? Non saremo noi a deciderlo. In un certo senso, questo è l'argomento della terza parte di questo libro, e sarebbe presuntuoso tentare di cortocircuitarlo con un semplice “sì” o “no”. Al massimo, questa domanda può servire da utile filo conduttore per il lettore che esamina i vari contributi che seguono, nella speranza che alla fine abbia una visione un po' più profonda e diversificata della questione, se non necessariamente più chiara.

La dialettica bachelardiana tra il noumeno, la teoria matematica, e il fenomeno sperimentale può aiutarci a comprendere il tempo. Il fenomeno scientifico nasce dalla dialettica tra la mente e la tecnica di realizzazione:

Questo legame così stretto, così indispensabile tra teoria e tecnica, ci sembra vada enunciato come un determinismo umano del tutto particolare, come un determinismo epistemologico che non era percepibile in alcun modo nella separazione tra le culture matematiche e quelle sperimentali.³⁹

Lo sperimentatore non si limita a osservare i fatti, ma li condiziona con il suo approccio. Guidato da concetti teorici e astratti, inventa esperimenti e costruisce strumenti che contribuiscono all'emergere di fenomeni scientifici. È questo che ci permette di strutturare il mondo: «Il vero ordine della Natura è quello che introduciamo tecnicamente in essa»⁴⁰. Non solo nel laboratorio scientifico, ma ben oltre, nella natura stessa. E così facendo, è lo sperimentatore stesso a rinnovarsi: «*La sperimentazione noumenica in laboratorio continua su larga scala e a cielo aperto. Questo superamento della Natura è anche mutazione dell'uomo*»⁴¹. Applichiamo questo pensiero a un esempio particolare: Einstein ci dice all'inizio del suo scritto del 1905 «Potrebbe sembrare che tutte le difficoltà che riguardano la definizione del “tempo” si potrebbero superare se sostituissi al posto di “tempo” l'espressione “posizione della lancetta piccola del mio orologio”»⁴². Egli prosegue sottolineando che, se tale definizione è sufficiente finché siamo interessati a eventi che avvengono solo nel luogo in cui si trova il mio orologio,

³⁷ Bachelard, G., *La formazione dello spirito scientifico*, op. cit., p. 71 [*La formation de l'esprit scientifique*, op. cit., p. 61].

³⁸ Bachelard, G., *La formazione dello spirito scientifico*, op. cit. [*Ibidem*, p. 242].

³⁹ Bachelard, G., *L'attività razionalista della fisica contemporanea*, op. cit., p. 255 [*L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, PUF, 1951, p. 223].

⁴⁰ Bachelard, G., *Il nuovo spirito scientifico*, op. cit., p. 151 [*Le nouvel esprit scientifique*, PUF, 2013].

⁴¹ Grange, J., op. cit.; Bachelard, G., *L'impegno razionalista*, tr. it. di E. Sergio, Milano, JacaBook, 2003 [*L'engagement rationaliste*, op. cit., p. 148].

⁴² Einstein, A., op. cit.

non lo è più quando dobbiamo collegare tra loro eventi lontani, cioè nella maggior parte dei casi pratici, come ad esempio l'affermazione: «una kilonova è stata osservata dal telescopio VISTA di Cerro Paranal (Cile) e un segnale di onde gravitazionali dal rivelatore Virgo (Pisa) nello stesso momento». Cosa significa «nello stesso momento» in questo caso? Per questi casi, Einstein sviluppò una costruzione matematica e fisica che definiva operativamente la simultaneità e quindi la sincronizzazione di orologi distanti. Quindi definisce un «tempo» al di là del mio orologio⁴³. Si noti che la definizione di Einstein non è unica per la relatività; esistono altre definizioni e sono comunemente utilizzate, ad esempio per le scale temporali che usiamo ogni giorno, come il Tempo Universale Coordinato (UTC). Ma tentiamo un'analisi fenomenotecnica del «tempo» di Einstein. Innanzitutto, notiamo l'emergere di questo tempo da uno strumento tecnologico costruito dallo sperimentatore («il mio orologio», dal pendolo all'orologio atomico). Ma a questo dobbiamo aggiungere la teoria, la mente dello sperimentatore (Einstein in questo caso⁴⁴) che costruisce tutta una costruzione matematica e operativa per arrivare a un «tempo» soddisfacente. Questi due aspetti sono perfettamente in linea con il pensiero fenomenotecnico di Bachelard. Sembra quindi chiaro che il tempo nella relatività speciale sia pienamente soggetto alla fenomenotecnica bachelardiana. Ma è davvero così? È così chiaro? Il tempo esiste solo grazie e a causa dei nostri strumenti di misura? Il tempo è «diventato scientifico solo nella misura in cui è diventato tecnico, nella misura in cui è accompagnato da una tecnica di realizzazione»⁴⁵? Einstein sarebbe probabilmente il primo ad essere contrario a una simile conclusione. Non dimentichiamo che è stata la relatività ristretta a unificare il tempo e lo spazio in un insieme che può essere visto come un insieme geometrico immutabile e deterministico, l'«universo a blocchi», che è ben lontano dalla concezione bachelardiana dei fenomeni scientifici la cui stessa esistenza è soggetta alla sperimentazione: «la scienza è meno di fatti che di effetti»⁴⁶. D'altra parte, il tempo (insieme allo spazio) sarebbe una matrice su cui si dispiegano gli effetti bachelardiani, perché la nozione stessa di «effetto» presuppone un tempo (e un luogo) in cui esso si verifica! Questo piccolo esempio mostra che non esiste una risposta ovvia alla domanda iniziale «il tempo può essere oggetto della fenomenotecnica bachelardiana?» e al relativo dilemma se sia vero o meno. Ma è utile, a nostro avviso, tenere a mente questa domanda nella lettura del volume.

⁴³ Abbiamo, quindi, due definizioni di tempo: una locale, data dal mio orologio (che oggi chiamiamo tempo proprio) e una non locale che Einstein ha chiamato «tempo dei sistemi stazionari», oggi spesso equiparato al tempo coordinato.

⁴⁴ Una piccola battuta: Einstein ha fatto solo esperimenti di pensiero (Gedankenexperiment). È sufficiente per un'analisi bachelardiana? Questo è un altro argomento interessante, ma non sarà affrontato qui.

⁴⁵ Bachelard, G., *La formazione dello spirito scientifico*, op. cit., p. 71 [*La formation de l'esprit scientifique*, op. cit., p. 61].

⁴⁶ Bachelard, G., *Noumène et microphysique*, op.cit., [« Études », 1970, p. 551-565].

Conclusione

Rileggere Bachelard può aiutarci a rispondere a queste domande. Il terzo periodo della filosofia bachelardiana si svolge tra il 1949 e il 1953. *Rationalisme appliqué* (1949), *l'Activité rationaliste de la physique contemporaine* (1951) e *Matérialisme rationnel* (1953) mettono insieme la dialettica della scienza che opera nella sua epistemologia e nella sua storia in modo disperso secondo le regioni del sapere. Bachelard individua un duplice movimento di razionalismo applicato e di materialismo razionale, che costituiscono i due aspetti di un'unica dialettica scientifica – epistemologica e storica – in grado di realizzare una sintesi storica tra ciò che prima sembrava contraddittorio. Nel 1951, nella conferenza “L'actualité de l'histoire des sciences”⁴⁷, Bachelard sottolinea l'effetto positivo della scienza sulla nostra mente: nel vero senso della parola, la scienza ci fa pensare. Il compito della filosofia della scienza è quello di spiegare questo pensiero attivo che sta alla base dell'attività scientifica. Per farlo, deve rileggere il percorso storico della conoscenza per cogliere il gesto scientifico di negare il passato e stabilire nuove conoscenze operative. Questo processo continua senza sosta e ci invita a tornare al progetto di Bachelard includendo la filosofia bachelardiana come un momento nel tempo. Per giudicare correttamente il passato, dobbiamo andare oltre e conoscere il presente. Per leggere correttamente Bachelard, non possiamo accontentarci di una lettura internalista della sua opera, ma dobbiamo metterla alla prova del suo futuro, che è anche il nostro contesto attuale. In altre parole, porre la questione dell'attualità di Bachelard alla luce degli sviluppi scientifici contemporanei non significa criticare Bachelard in modo anacronistico, ma verificare la pertinenza della matrice delle sue analisi e dei suoi concetti con il metro della scienza contemporanea. Per giudicare correttamente il passato, compreso Bachelard, è necessario conoscere il presente⁴⁸. Nel 2001, Pariente ci ha ricordato che «l'unico modo per essere fedeli a Bachelard (1884-1962) sarebbe quello di estendere la sua opera tenendosi al passo con gli ultimi sviluppi e le ultime domande del sapere»⁴⁹. La scienza non sta tornando indietro: al contrario, le sue apparenti rotture rafforzano la sua profonda continuità. «Lo storico delle scienze, mentre cammina lungo un passato oscuro, deve aiutare gli spiriti a prendere coscienza del valore profondamente umano della scienza»⁵⁰. La storia fa luce ricorrente⁵¹ nel senso che ci insegna a individuare le serie ricorrenti che organizzano la storia del razionalismo, inteso come funzione che mette in contatto le nostre menti con la realtà⁵². Giudica quando conosce:

⁴⁷ Bachelard, G., *L'attualità della storia delle scienze*, in *L'impegno razionalista*, tr. it. di E. Sergio, Milano, JacaBook, 2003 [*L'actualité de l'histoire des sciences*, Paris, Vrin, 1967, p. 136-150].

⁴⁸ Ivi, p. 140.

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

⁵⁰ Bachelard, G., *L'attualità della storia delle scienze*, op. cit., p. 151 [*L'actualité de l'histoire des sciences*, op. cit., p. 150].

⁵¹ Bachelard, G., *L'attualità della storia delle scienze*, op. cit., p. 152 [*L'actualité de l'histoire des sciences*, op. cit., p. 141].

⁵² Canguilhem ha sottolineato la necessità di fare buon uso della ricorrenza, Canguilhem, G., *Ideologia e razionalità nella storia delle scienze della vita*, tr. it. di Jervis, P., Scandicci, La nuova

normalizza⁵³, nella misura in cui incorpora necessariamente giudizi, norme e valori. Questo processo trasforma la verità di un momento in un caso particolare di una teoria più generale; la storia rettifica costantemente il suo passato per farne il nostro presente. Questo doppio gesto di scadenza e sanzione esprime la nostra attualità, nel senso di un'evoluzione del nostro spirito scientifico, che non è altro che l'«atto epistemologico»⁵⁴ della «scienza attualmente attiva». Ogni nuova tappa permette di inglobare il passato recente in una logica più globale e di collocare più chiaramente il passato remoto in funzione del suo imprevedibile avvenire. Questo movimento storico mette così in crisi ogni pretesa di storia definitiva e impone «la necessità di rifare la storia della scienza, uno sforzo per capire modernizzando»⁵⁵.

Questa necessità è tanto più urgente se si considera che la storia della scienza è anche la nostra. «I concetti e la concettualizzazione vanno di pari passo [...], si può affermare che il pensiero si modifica nella forma se si modifica nel proprio oggetto»⁵⁶. La nostra ontologia è in gioco attraverso il nostro sviluppo epistemologico e tecnico. Tracciando il percorso che porta al nostro presente, lo storico ci permette di capire noi stessi e la nostra società. La storia della scienza non è solo storia della cultura⁵⁷, ma anche storia dello spirito scientifico, la nostra storia: «la storia della scienza è divenuta, nel tempo, storia di una città scientifica. Nel periodo contemporaneo, la città scientifica ha una coerenza razionale e tecnica che esclude qualsiasi ritorno al passato»⁵⁸. La scienza si sta rivelando un «potenza di trasformazione»⁵⁹; organizza la nostra forma di vita concreta e dà origine a una cultura come momento di ciò che siamo.

Questo numero di Bachelard Studies è il prosieguo di un progetto di ricerca finanziato dalla Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (MITI), dal Labex FIRST TF, dalla Maison des sciences de l'homme et de l'environnement e dall'Université de Franche-Comté.

Sarah Carvallo

Université Claude Bernard Lyon 1

sarah.carvallo@univ-lyon1.fr

Italia, 1992 [*Idéologie et Rationalité dans l'histoire des sciences de la vie*, « Etudes d'histoire et de philosophie des sciences », p.24].

⁵³ Bachelard, G., *Il razionalismo applicato*, tr. it. di Giannuzzi, M., Semerari, L., Bari, Dedalo edizioni, 1975 [*Le rationalisme appliqué*, Paris, PUF, 1949, p. 59].

⁵⁴ Bachelard, G., *L'attività razionalista della fisica contemporanea*, op. cit. [*L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1951, p. 25].

⁵⁵ Ivi, p. 145.

⁵⁶ Bachelard, G., *Il nuovo spirito scientifico*, op. cit., p. 98 [*Le nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, [1934] 1968, p. 44].

⁵⁷ Bachelard, G., *Il razionalismo applicato*, tr. it. di M. Giannuzzi, L. Semerari, Bari, Dedalo edizioni, 1975 [*Le rationalisme appliqué*, Paris, PUF, [1949] 1966, p. 38].

⁵⁸ Bachelard, G., *L'attualità della storia delle scienze*, in *L'impegno razionalista*, tr. it. di E. Sergio, Milano, JacaBook, 2003, pp. 147-160 [*L'actualité de l'histoire des sciences*, op. cit., p. 150].

⁵⁹ Bachelard, G., *Sulla natura del razionalismo*, in *L'impegno razionalista*, op. cit., p. 63 [*De la nature du rationalisme in L'engagement rationaliste*, op. cit., p. 45].

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

Références

- Alunni, Ch., *Spectres de Bachelard*, Paris, Hermann, 2019 ;
- Bachelard, G., *Sulla natura del razionalismo*, in *L'impegno razionalista*, tr. it. di E. Sergio, Milano, JacaBook, 2003 [*De la nature du rationalisme*, in *L'engagement rationaliste*, Paris, PUF, 1972] ;
- Bachelard, G., *Il nuovo spirito scientifico*, tr. it. di L. Geymonat, P. Redondi, Bari, Laterza, 1978 [*Le nouvel esprit scientifique*, PUF, 2013] ;
- Bachelard, G., *Il razionalismo applicato*, tr. it. di Giannuzzi, M., Semerari, L., Bari, Dedalo edizioni, 1975 [*Le rationalisme appliqué*, Paris, PUF, 1949; *Le rationalisme appliqué*, Paris, PUF, [1949] 1966] ;
- Bachelard, G., *Il valore induttivo della relatività*, tr. it. di A. Alison, Milano, Mimesis, 2022 [*La valeur inductive de la relativité*, Paris, Vrin, 2014] ;
- Bachelard, G., *L'attività razionalista della fisica contemporanea*, tr. it. di C. Maggioni, Milano, JacaBook, 2020 [*L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1951] ;
- Bachelard, G., *La filosofia del non*, tr. it. di A. Vio, Catania, Pellicanolibri, 1978 [*La philosophie du non. Essai d'une philosophie du Nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, 1940] ;
- Bachelard, G., *La formazione dello spirito scientifico*, tr. it. di E. Castelli Gattinara, Milano, Cortina, 1996 [*La formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1967] ;
- Bachelard, G., *L'impegno razionalista*, tr. it. di E. Sergio, Milano, JacaBook, 2003 [*L'actualité de l'histoire des sciences*, Paris, Vrin, 1967 ; *L'engagement rationaliste*, Paris, PUF, 1972] ;
- Bachelard, G., *Noumène et microphysique*, tr.it. di M.Chiappini, *La ragione scientifica*, Bertani, Verona 1974 [*Noumène et microphysique*, « Études », p. 11-24 in *Recherches philosophiques*, 1931, p. 551-565 ; *Noumène et microphysique*, « Koyré », Puech et Spaier, vol. 1, Paris, Boivin & Cie, 1931-1932, p. 55-65] ;
- 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, 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., *Ideologia e razionalità nella storia delle scienze della vita*, tr. it. di Jervis, P., Scandicci, La nuova Italia, 1992 [*Idéologie et Rationalité dans l'histoire des sciences de la vie*, « Études d'histoire et de philosophie des sciences »] ;
- Einstein, A., *Lettre à la famille de Michele Besso* (1955) in *Corrispondenza con Michele Besso* (1903-1955), tr. it. di G. Gembillo, Napoli, Guida, 1995 [*Œuvres choisies*, t. 5, Seuil, 1991] ;
- Einstein, A., *Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento* in *Opere scelte*, tr. it. di E. Bellone, Torino, Bollati Boringhieri, 1988, pp. 148-177 [*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, « Annalen der Physik », vol. 322, n° 10, 26 settembre 1905, pp. 891-92] ;
- Fabry, L., *Phénoménoteknique: Bachelard's Critical Inheritance of Conventionalism*. « Studies in History and Philosophy of Science », Part A, Elsevier, 2019 ;
- Feyerabend, P., *Il realismo scientifico e l'autorità della scienza*, tr. it. di Artosi, A., Milano, Il Saggiatore, 1983 [*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*, Centre culturel de Cerisy, Sep 2015, Cerisy-la-Salle, France. pp.90. halshs-01336345 ;
- Harmut, R., *Accelerazione e alienazione: Per una teoria critica del tempo nella tarda modernità*, tr. it. di Leonzio, E., Torino, Einaudi, 2015;
- Declos, A. ; Tiercelin, Cl., eds. *La métaphysique du temps. Perspectives contemporaines*, Paris, Collège de France, 202 ;
- Lecourt, D., *L'epistemologia di Gaston Bachelard*, tr. it. di R. Lanza, M. Magni, Milano, JacaBook, 1997;
- McTaggart, J.M.E., *L'irrealtà del tempo*, tr. it. di L. Cimmino, Milano, Rizzoli, 2006 [*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, 1 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;
- Musso, P., *Imaginaire, Industrie et innovation*, Centre culturel de Cerisy, Sep 2015, Cerisy-la-Salle, France. pp.90. halshs-01336345 ;
- 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 ;
- Rovelli, C., *Che cos'è il tempo? Che cos'è lo spazio?*, Roma, Di Renzo, 2014.
- Verbale del 13° CGPM (1967), 1969 ;
- Vigoureux, J.M., *L'univers en perspective*, Paris, Ellipses, 2006 ;
- Wolff, F., *Le temps du Monde*, Paris, Le Seuil, 2023.

Gilles Cohen-Tannoudji, Jean-Pierre Gazeau

Phénoménotechnique du temps et cosmogonie scientifique

1. Introduction

Le titre que nous avons choisi pour notre contribution signifie que nous pensons que les problèmes de la *phénoménotechnique bachelardienne* du temps se posent dans la convergence des deux grandes disciplines de la recherche fondamentale nées au début du vingtième siècle, la *physique des particules* qui est la théorie des composants élémentaires de la matière et des interactions fondamentales auxquelles ils participent et la *cosmologie* qui est la théorie du tout de l'univers, pour former ce que nous appelons une *cosmogonie scientifique*, qui serait la théorie de l'origine *temporelle* de l'univers et que nous proposons d'associer au *noumène bachelardien*. *Phénoménotechnique* et *noumène* sont les deux concepts qui apparaissent dans l'article daté de 1931 de Bachelard intitulé *Noumène et microphysique*¹.

Cet article de Gaston Bachelard, s'inscrit dans les vifs débats qui se déroulaient alors à propos de la signification de la physique quantique, (voir en particulier le célèbre article 'EPR'² datant de 1935), et ceux des débuts de la relativité générale (voir l'article d'Einstein et Rosen³, publié quelques semaines après). Il est intéressant de noter la clairvoyance de Gaston Bachelard, d'une part, à propos de la physique quantique quand on compare, comme nous allons le faire dans les deux premières parties, ses vues avec celles qui ont fait consensus dès les lendemains de la seconde guerre mondiale⁴, et d'autre part à propos des spectaculaires progrès de la cosmologie contemporaine comme nous le montrerons dans les quatrième et cinquième parties de notre contribution.

¹ Bachelard, G., *Noumène et Microphysique*, in A. Koyré, H.C.H. Puech, A. Spaier, *Recherches Philosophiques*, Paris, Boivin&Cie, 1931-1932, pp. 35-65.

² Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N., « Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? », *Physical Review*, Vol. 47, 1935, pp. 777-780.

³ A. Einstein, N. Rosen, « The Particle Problem in the General Theory of Relativity », *Physical Review*, Vol. 48, 1935, pp. 73-77.

⁴ Lemaître, G., *L'Hypothèse de l'atome primitif. Essai de cosmogonie*, préface de F. Gonseth, Neuchatel, Editions du Griffon, 1946; Pauli, W. (ed.), *Dialectica*, Vol.II, n° 3-4, « L'idée de complémentarité », Neuchatel, Editions du Griffon, 1948.

Le passage de *Noumène et microphysique* qui nous a paru le plus significatif du point de vue de la comparaison avec le consensus à propos de la physique quantique à la fin des années quarante est le suivant :

Ainsi le monde caché dont nous parle le physicien contemporain est d'essence mathématique. Le physicien fait ses expériences en se fondant sur le caractère rationnel du monde inconnu. On exprimerait peut-être assez bien la conviction du physicien, au sortir du doute relatif à son emprise sur la réalité, par la formule suivante : *cogitatur, ergo est*, étant entendu que le fait d'être pensé mathématiquement est la marque d'une existence à la fois organique et objective (...) Devant tant de succès de la recherche rationnelle, comment se défendre de poser *sous le phénomène, un noumène* (souligné par nous) où notre esprit se reconnaît et s'anime ! Ce noumène n'est pas un simple postulat métaphysique ni un conventionnel signe de ralliement. Nous lui trouvons en effet, par la réflexion, une structure complexe ; c'est même à cette complexité harmonique qu'il doit son objectivité discursive, cette objectivité qui seule peut s'exposer, s'éprouver, confirmer son universalité. Nous pourrions donc dire que la physique mathématique correspond alors à une nouménologie bien différente de la phénoménographie où prétend se cantonner l'empirisme scientifique. *Cette nouménologie éclaire une phénoménotechique par laquelle des phénomènes nouveaux sont, non pas seulement trouvés, mais inventés, mais construits de toutes pièces.*⁵

2. Nouménologie bachelardienne et complémentarité en mécanique quantique

Comment ne pas mettre en regard ce passage de l'article de Bachelard avec l'ensemble du numéro 7/8 de la revue *Dialectica*, fondée par Ferdinand Gonseth, Gaston Bachelard, et Paul Bernays, consacré à l'idée de complémentarité, et qui comportait, outre l'éditorial de Wolfgang Pauli qui en avait coordonné la réalisation, les contributions de Bohr, Einstein, de Broglie et Heisenberg ainsi qu'un texte très important de Gonseth ? Dans son éditorial, Wolfgang Pauli résume la teneur du débat qui a opposé Einstein et Bohr, et il attire l'attention du lecteur sur

Les tentatives intéressantes de Ferdinand Gonseth de formuler l'idée de complémentarité de façon si générale qu'aucune référence explicite ne soit plus faite à la physique au sens propre. Ceci, bien sûr, n'est possible que par l'usage d'un langage auquel les physiciens ne sont pas habitués, qui utilise des expressions comme '*horizon de réalité*', '*horizon profond*' et '*horizon apparent*', '*événements d'un certain horizon*'. Le mot '*phénomène*' cependant est utilisé dans cet article strictement dans le sens, mentionné ci-dessus, que lui donne Bohr. A l'*'horizon profond*' de Gonseth appartiennent les objets symboliques auxquels des attributs conventionnels ne peuvent être assignés de façon non-ambiguë, tandis que les '*traces*' de Gonseth sont identiques aux '*phénomènes*' au sens que nous donnons à ce terme.⁶

⁵ Bachelard, G., *Noumène et métaphysique*, cit., Souligné par nous.

⁶ Pauli, W. (ed.), *Dialectica*, cit., p. 310.

La correspondance entre les concepts de la complémentarité quantique et ceux de la nouménologie de Bachelard fonctionne terme à terme : les noumènes bachelardiens sont à relier, dans l'interprétation des *phénomènes*, aux « 'objets' atomiques qui ne peuvent plus être décrits 'd'une façon

uniquement en termes d'attributs physiques conventionnels'. Ces objets '*ambigus*' utilisés dans la description de la nature ont un caractère évidemment symbolique»⁷. Quant au *phénomène* au sens que lui donne Bohr, il ne peut se comprendre, au sens bachelardien, que comme un élément d'une *phénoménotechnique*, puisque sa définition même implique la prise en compte des conditions de l'observation expérimentale.

3. Nouménologie et phénoménotechnique du temps en physique des particules

Dans sa contribution intitulée *Mécanique quantique et réalité*⁸ au numéro de *Dialectica* consacré à la complémentarité, Einstein a repris l'argumentation basée sur l'article EPR, qu'il exprime sous la forme du principe relativiste *des actions par contiguïté*, un principe qui permet de caractériser ce qu'il appelle '*l'indépendance relative des choses distantes spatialement*', dont il affirme que '*seule la théorie du champ en a fait une application conséquente*'. Auparavant il avait en effet rappelé le grand principe de la physique relativiste :

« Ce qui caractérise les choses de la physique, c'est qu'elles sont pensées comme étant rangées dans un continuum d'espace-temps. Et, ce qui paraît essentiel dans cet arrangement des choses introduites en physique, c'est qu'à un moment donné ces choses revendiquent une existence autonome dans la mesure où elles se trouvent dans des 'parties différentes de l'espace'. Sans cette hypothèse d'existence autonome (un 'être ainsi') des choses spatialement distantes – hypothèse issue, à l'origine, de notre expérience de tous les jours – la pensée physique, au sens qui nous est habituel, serait impossible. On ne voit pas non plus comment, sans cette disjonction bien nette, il serait possible de formuler des lois physiques et de les vérifier. La théorie du *champ* (souligné par nous) a développé à l'extrême ce principe, dans la mesure même où les choses élémentaires, existant de façon indépendante les unes des autres, sur lesquelles elle se fonde, ainsi que les lois élémentaires qu'elle postule pour celles-ci, y sont localisées à l'intérieur d'éléments spatiaux (à quatre dimensions) infiniment petits.

Mais l'argument développé par Einstein dans son article ne s'applique pas à un champ, mais à un « système » de deux particules ou atomes, et, comme il le dit dans sa lettre adressée à Pauli en tant que coordonnateur du débat à paraître dans *Dialectica* :

⁷ *Ibidem*, p. 308.

⁸ Einstein, A., *Mécanique quantique et réalité*, cit., pp.320-324. Dans le volume cité, l'article d'Einstein est en allemand. Nous nous référons à sa traduction en français parue dans Id., *Œuvres choisies d'Einstein*, Tome I Quanta, Paris, Seuil CNRS, pp. 244-249.

Cher Pauli,

A votre lettre, je vois avec plaisir que vous avez lu attentivement mon petit article. Vous ne croyez pas plus que moi à une action à distance immédiate. Pour échapper à cette hypothèse, vous concevez la fonction Ψ non pas comme la description d'un système individuel mais comme la description d'un ensemble de systèmes. Mais cela signifie seulement une chose : vous pensez que la situation réelle n'est pas décrite de façon complète par la fonction Ψ .

Et c'est à cette accusation d'incomplétude que répond Bohr : d'après lui, c'est Einstein qui, dans son argumentation ne prend pas en compte de façon complète les conditions de l'observation :

Dans ce contexte, il est essentiel de noter que, dans toute application bien définie de la mécanique quantique, il est nécessaire de spécifier *la totalité de l'arrangement expérimental* (souligné par nous) et que, en particulier, la possibilité de disposer des paramètres définissant le problème de mécanique quantique ne correspond qu'à notre liberté de construire et de manipuler les appareils de mesure, ce qui, alors, signifie la liberté de choisir parmi les différents types complémentaires de phénomènes ceux que nous voulons étudier. De façon à éviter des inconsistances logiques dans la prise en compte de cette situation non-familière, on doit être évidemment très attentif aux questions de terminologie et de dialectique. Ainsi des phrases fréquentes dans la littérature physicienne, telles que '*perturbation des phénomènes par l'observation*' ou '*création d'attributs physiques par la mesure*' représentent un usage de termes tels que '*phénomène*' et '*observation*' aussi bien que '*attributs*' et '*mesure*' qui est difficilement compatible avec un usage commun et une définition pratique et, donc prêtent à confusion. Comme un moyen plus approprié de s'exprimer, on pourrait fortement recommander de limiter l'usage du mot *phénomène* pour se référer exclusivement à des observations obtenues sous des circonstances spécifiées, incluant la prise en compte de la totalité de l'expérience.⁹

Mais, si les phénomènes corpusculaires ou ondulatoires ne sont compris que comme relevant de phénoménotecniques contradictoires, peut-on qualifier de noumène l'objet de l'expérience EPR ? S'agit-il d'un champ pour répondre aux exigences de la relativité telles que les exprime Einstein, ou d'un système de deux atomes ou corpuscules inextricablement liées¹⁰, pour répondre aux exigences de la mécanique quantique telles que les exprime Bohr ? Il nous semble que la réponse à cette interrogation ne pouvait être apportée que par la mise en œuvre de la *théorie quantique des champs* dans laquelle le concept de *champ quantique*, dont les caractéristiques internes sont dissociées de sa description spatiotemporelle, peut, comme nous allons maintenant l'expliquer, être considéré comme relevant de la nouménologie bachelardienne.

⁹ Bohr, N., *op. cit.*, pp. 316-317.

¹⁰ On pourrait dire aujourd'hui "intriqués", comme peuvent l'être des caractéristiques internes, e.g. spin, sans localisation spatiale. L'outil mathématique nécessaire à leur prise en compte est le produit tensoriel d'espaces vectoriels, une notion loin d'être évidente et trop souvent occultée dans les présentations (grand public ou même public averti) des subtilités du formalisme quantique. La maîtrise de cet outil est pourtant fondamentale pour comprendre l'intrication quantique.

3.1. Système de champs quantiques en interaction, le noumène de la physique des particules

Le concept de champ quantique, prolongeant celui de champ relativiste¹¹, a en effet été élaboré pour répondre aux besoins de la physique des particules, une physique de haute énergie, éminemment quantique et relativiste : un champ quantique est une structure relativiste, s'étendant à l'ensemble de l'espace-temps, qui consiste en opérateurs d'émission ou d'absorption d'un quantum de champ, pouvant être une particule ou une antiparticule. Un système de tels champs quantiques en interaction peut tout à fait relever de la nouménologie bachelardienne ; c'est ce qu'affirme le regretté Stephen Weinberg, en disant que les champs quantiques sont les 'ingrédients de base de l'univers' :

Dans sa forme mature, l'idée de la théorie quantique des champs est que les champs quantiques sont les ingrédients de base de l'univers, et les particules ne sont que des paquets d'énergie et d'impulsion des champs. Dans une théorie relativiste la fonction d'onde est une fonctionnelle de ces champs, pas une fonction des coordonnées des particules. La théorie quantique des champs a donc conduit à une vision plus unifiée de la nature que l'ancienne interprétation dualiste en termes à la fois de champs et de particules.¹²

3.2. L'intégrale de chemins de Feynman, la phénoménoteknik en physique des particules

La méthodologie de l'intégrale de chemins développée par Feynman à propos de l'électrodynamique quantique (QED, Quantum Electrodynamics) consiste en une intégrale fonctionnelle (une intégrale à une infinité continue de variables d'intégrations !) portant sur toutes les histoires possibles de l'univers en quoi consiste le système de champs quantiques en interaction. Malgré son caractère inimaginablement complexe, il se trouve, comme on pourra s'en convaincre à la lecture de Diagrammes et amplitudes de Feynman, la partition du modèle standard¹³, qu'il a été possible, en quelque sorte, de mettre en musique ce programme, avec un succès impressionnant en électrodynamique quantique, et qu'il a été possible de le généraliser à toutes les interactions fondamentales (gravitation non comprise) en physique des particules, sans préjuger de certaines de ses difficultés mathématiques insurpassables.

Mais, alors que le concept de champ relativiste suppose un cadre spatio-temporel, les particules qui ne sont que des paquets d'énergie et d'impulsion, manifestations, observées en laboratoire, ne dépendent pas de l'espace-temps du laboratoire,

¹¹ L'adjectif « relativiste » est pris ici au sens relativité Einsteinienne, sachant qu'il existe d'autres relativités, galiléenne, deSitterienne, etc, comme il l'a été bien démontré dans la classification de Bacry et Lévy-Leblond, « Possible Kinematics », *J. Math. Phys.*, Vol. 9, 1968, pp. 1605-1614.

¹² Steven Weinberg, *What is Quantum Field Theory, and What Did We Think It Is*,

¹³ Cohen-Tannoudji, G., *Diagrammes et amplitudes de Feynman, la partition du modèle standard*, in F. Nicolas (ed.), *Les mutations de l'écriture*, Paris, Éditions de la Sorbonne 2013.

et qu'elles s'observent plutôt dans l'espace des énergies-impulsions, conjugué ou réciproque, par transformation de Fourier de cet espace-temps, qui est, en quelque sorte éliminé par intégration. D'autre part, d'après la théorie quantique, ces observations d'événements individuels ne peuvent être décrites que de façon statistique. La phénoménoteknik expérimentale de la théorie quantique des champs, n'est donc pas, à proprement parler une phénoménoteknik du temps, mais les théories de jauge sur réseau où on remplace l'espace-temps par un espace-temps fictif discrétisé à quatre dimensions, appelé réseau, permettent de faire des prédictions de nature statistique ou de produire des simulations informatiques des effets de la théorie quantique des champs, utiles, comme nous le montrons plus bas [§ 5-3 ci-dessous], en cosmogonie scientifique supposée être une théorie des débuts temporels de l'univers.

4. Nouménologie et phénoménoteknik du temps en cosmologie quantique

Comme le concept de champ, qu'il soit quantique ou non, suppose une structure s'étendant à l'ensemble de l'espace-temps, c'est-à-dire à l'univers entier, se pose inévitablement la question de l'existence d'une nouménologie en *cosmologie*. Il se trouve que c'est en cosmologie qu'a surgi un problème du temps, à propos duquel Einstein a eu des débats avec de Sitter, Friedman et Lemaître. Partant de l'égalité de la masse inertielle et de la masse gravitationnelle, qu'il érige en *principe universel d'équivalence*, Einstein a tenté un modèle cosmologique, dans lequel ce principe serait satisfait. Dans ce modèle, l'univers serait *statique* grâce à la réintroduction du terme cosmologique faisant intervenir la fameuse constante cosmologique, qu'il avait écarté dans ses premières tentatives d'établir les équations de la relativité générale, mais qui serait capable d'empêcher l'effondrement de son univers sous l'effet de sa propre gravitation¹⁴.

4.1 de Sitter et la "matière-monde"

Un vif débat l'oppose alors à de Sitter, qui lui, avait opposé au modèle d'Einstein, qu'il appelle 'le système A' un autre modèle cosmologique, qu'il appelle 'le système B' comportant un univers sans matière mais obéissant aux équations d'Einstein avec seulement le terme cosmologique et sa constante :

permettant de satisfaire le "*principe matériel de relativité de l'inertie*" en jouant le rôle d'une matière hypothétique, dont la masse totale est tellement énorme qu'en

¹⁴ Une des contributions les plus remarquables de la physique mathématique fut de montrer, en fait, qu'une des caractéristiques internes de systèmes composites, noyaux, atomes, molécules, la statistique dite de Fermi, empêche leur effondrement. Voir Lieb, E.H., Thirring, E., «Bound for the Kinetic Energy of Fermions Which Proves the Stability of Matter », *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 35, 1975, pp. 687 – 689.

comparaison, toute la matière qui nous est connue est complètement négligeable' (*utterly negligible*). Cette matière hypothétique, je l'appellerai la *matière-monde* (*world – matter*).¹⁵

Puisque, dit de Sitter, si on néglige la matière qui nous est connue, la constante cosmologique Λ permet de satisfaire le principe matériel de relativité de l'inertie, et que, si on ne néglige pas la matière qui nous est connue, ce principe ne peut être satisfait que grâce à cette constante, c'est que « *l'introduction de cette constante ne peut être évitée que par l'abandon concomitant du postulat de relativité de l'inertie* » (souligné par nous). Et à propos de la matière-monde, il ajoute l'importante remarque qui suit :

En fait, il n'y a pas de différence essentielle entre la nature de la matière ordinaire gravitante et celle de la matière-monde. La matière ordinaire, le soleil, les étoiles, etc., ne sont que de la *matière-monde condensée*, et il est possible, sans que ce soit une nécessité, de supposer que toute la matière-monde soit ainsi condensée

4.2 de Sitter et le 'temps extra-mondain'

En ce qui concerne le problème du temps, de Sitter introduit un autre concept, particulièrement important pour notre propos :

Le monde à trois dimensions doit, pour pouvoir accomplir des "mouvements" c'est-à-dire pour que sa position puisse être une fonction variable du temps, être pensé mobile dans un espace "absolu" à trois dimensions ou plus (pas l'espace-temps x, y, z, ct). Le monde à quatre dimensions requiert pour son mouvement *un espace absolu à quatre (ou plus) dimensions, et de plus un temps extra-mondain qui sert de variable indépendante à ce mouvement*.¹⁶

4.3 L'éther de la relativité générale selon Einstein

Einstein, qui avait rejeté l'idée d'un éther en théorie restreinte de la relativité, a reconnu en 1920, l'existence d'un éther en théorie générale la relativité, qui pourrait bien n'être autre, comme nous allons le montrer ci-dessous, que la matière-monde de de Sitter :

En récapitulant, on peut dire que selon la théorie de la relativité générale l'espace est doté de qualités physiques ; en ce sens, donc, il existe un éther. Selon la théorie générale de la relativité, l'espace sans éther est impensable ; car dans un tel espace non seulement il n'y aurait pas de propagation de la lumière, mais aussi pas de possibilité d'existence pour les moyens de mesurer l'espace et le temps (les règles et les horloges), ni donc

¹⁵ de Sitter, W., *On the relativity of inertia. Remarks concerning Einstein's latest hypothesis*, in KNAW, Proceedings, 19 II, Amsterdam, 1917, pp. 1217-25 [en ligne: https://sites.pitt.edu/~jdnorton/teaching/Einstein_graduate/2590_Einstein_2015/pdfs/de%20Sitter%20Amst%20Acad%201917.pdf].

¹⁶ Souligné par nous.

d'intervalles d'espace-temps au sens physique. Mais cet éther ne peut être considéré comme doté de la qualité caractéristique des milieux pondérables, comme composé de parties qui peuvent être suivies dans le temps (irréductibilité). L'idée de mouvement peut ne pas s'appliquer à cela (énergie au repos).¹⁷

4.4 Les polémiques avec Friedmann et Eddington

De son côté, Friedman fait remarquer que la théorie d'Einstein est une théorie dynamique, et que, avec ou sans terme cosmologique, elle est compatible avec un univers en expansion, ou en contraction ou statique. Einstein reproche à Friedman une « erreur de calcul », un reproche qu'il admet, un peu plus tard être infondé.

Quand, un peu plus tard, Eddington montre que l'équilibre invoqué par Einstein entre la gravitation et l'effet du terme cosmologique ne peut qu'être instable, Einstein reconnaît la validité de cette remarque d'Eddington, et donc renonce à la réintroduction du terme cosmologique dont il dit qu'elle ne fait que traduire la plus grosse erreur qu'il ait commise. A partir de là, Einstein s'est de moins en moins intéressé à la cosmologie, et le consensus parmi les astrophysiciens a été de suivre Einstein et d'oublier la constante cosmologique.

4.5 Georges Lemaître et Ferdinand Gonseth, le défi d'une cosmogonie scientifique

Il nous faut reconnaître qu'Einstein a commis, dans cet épisode, plusieurs erreurs, dont la moindre n'est pas celle de ne pas avoir réalisé que la théorie qu'il était en train d'élaborer est en fait une théorie *dynamique de l'univers* ! Cette erreur l'a fait passer à côté de l'une des plus importantes découvertes du vingtième siècle, celle de *l'expansion de l'univers*, dont les véritables découvreurs sont Friedman et le chanoine Georges Lemaître¹⁸. C'est ce dernier qui, en 1927, a établi : « la loi liant la vitesse de fuite des nébuleuses extragalactiques à leur éloignement. Deux ans plus tard, cette loi devait être brillamment confirmée par les mesures de Hubble. Ce succès initial fondait solidement la cosmogonie du savant belge »¹⁹.

C'est lui aussi qui a tenu tête à Einstein dans le débat qu'ils ont eu à propos de la constante cosmologique : dans son ouvrage préfacé par Gonseth, il affirme en effet à propos de la *répulsion cosmique* induite par la constante cosmologique :

« La répulsion cosmique n'est pas une hypothèse spéciale introduite pour éviter des difficultés qui se présentent dans l'étude de l'univers. Si Einstein l'a introduite dans son mémoire cosmologique, c'est parce qu'il se souvenait l'avoir arbitrairement laissé

¹⁷ Einstein, A., *Sidelights on Relativity. Ether and the Theory of Relativity*, An Address delivered on May 5th, 1920, in the University of Leyden", London, Methuen & Co., 1922, pp. 23-24.

¹⁸ Friedmann, A. « Über die Krümmung des Raumes », *Zeitschrift für Physik*, Vol. 10, 1922, pp. 377-386; Id., « Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes », *Zeitschrift für Physik*, Vol. 21, 1924, pp. 326-332.

¹⁹ Gonseth, F., *Préface*, in *L'hypothèse de l'atome primitif*, cit.

tomber lorsqu'il avait établi les équations de la gravitation. La constante cosmologique s'impose logiquement dans le développement de la théorie. La supprimer revient à la fixer arbitrairement en lui donnant une valeur particulière, zéro²⁰.

5. Le défi d'une cosmogonie scientifique, le noumène bachelardien de la cosmologie

Une remarque d'ordre terminologique est ici nécessaire. Dans l'ouvrage cité ci-dessus, ni Lemaître, ni Gonseth n'utilisent le terme de cosmologie pour désigner la science de l'univers formant un tout, ils lui préfèrent le terme *cosmogonie*, ce que Lemaître définit à la fin de l'ouvrage comme : « l'objet d'une théorie cosmogonique est de rechercher des conditions initiales idéalement simples d'où a pu résulter, par le jeu des forces physiques connues, le monde actuel dans toute sa complexité »²¹.

Lemaître, prêtre catholique, qui a eu à faire face à des critiques venant des milieux agnostiques ou matérialistes et à des tentatives de récupération par l'église catholique²², a pris grand soin de marquer une nette frontière entre ce qui relève de sa foi en une création divine du monde, et ce qu'il appelle la cosmogonie, qu'il considère comme une authentique discipline scientifique, étudiant le début naturel de l'univers. Soutenu efficacement par Gonseth, c'est donc un véritable défi qu'il lance, ce que nous appelons le *défi d'une cosmogonie scientifique*, un défi, que nous proposons de considérer comme le noumène bachelardien de la cosmologie quantique.

5.1. La singularité du big bang et les difficiles débuts de la cosmologie

La réédition au Seuil par Jean-Pierre Luminet de l'ouvrage de Lemaître, associé à des textes d'Alexandre Friedman, a pour titre *Essais de cosmologie*, et comme sous-titre *L'invention du big bang*²³, au lieu de celui utilisé par Lemaître, *essai de cosmogonie*.

Les termes *big bang* (grand boum), maintenant entrés dans le langage commun, figurent dans le nom du premier modèle cosmologique, *négligeant la constante cosmologique*, qui intègre la donnée de l'expansion de l'univers, et qui rend compte de manière plus ou moins satisfaisante de la plupart des données de l'observation (loi de Hubble, abondance des éléments légers, observation du rayonnement cosmologique microonde CMB), le *Hot big bang model* (HBBM le modèle du big bang chaud). Ces termes désignent une singularité mathématique (densité de matière-énergie infinie) intervenue dans l'univers primordial qui, au travers des trois problèmes ci-dessous énoncés, empêche ce modèle d'être considéré comme celui d'une possible cosmogonie scientifique :

²⁰ Lemaître, G., *L'hypothèse de l'atome primitif*, cit., p. 116.

²¹ *Ibidem*.

²² Lambert, D., *Un atome d'univers. La vie et l'œuvre de Georges Lemaître*, Paris, Lessius, 2011.

²³ Friedmann, A., Lemaître, G., *Essais de cosmologie précédés de L'invention du big bang* par J.-P. Luminet, Paris, Seuil, 1997.

1. Le problème dit de l'*horizon* est dû au fait que la singularité du big bang implique une expansion de l'espace qui est si rapide que les régions de l'univers en équilibre thermique que l'on observe aujourd'hui ne peuvent pas avoir été en contact causal dans l'univers primordial.

2. Le problème dit de la *platitude* est ce que l'on appelle un problème d'*ajustement fin*, car dès les années soixante du 20^{ème} siècle, les observations suggéraient l'absence de courbure spatiale dans l'univers d'aujourd'hui, mais comme cette courbure spatiale est liée à un index k supposé indépendant du temps, il faudrait, pour maintenir son annulation pendant toute l'histoire de l'univers, un *ajustement* des paramètres tellement fin, qu'il rendrait le modèle totalement non crédible.

3. Le troisième problème est l'absence d'observation, dans l'univers d'aujourd'hui, des *monopoles magnétiques*, qui devraient, d'après les *théories de jauge* du modèle standard de la physique des particules, y être présents en grands nombres.

Ces difficultés ne font que traduire l'inconséquence de toute tentative de cosmologie ignorant les avertissements de de Sitter et Lemaître que nous avons évoqués plus haut : pas de cosmologie sans une matière-monde représentant la quasi-totalité du contenu de l'univers actuel et lui permettant de satisfaire le principe de relativité de l'inertie ; pas d'expansion de l'univers sans répulsion cosmique, donc sans constante cosmologique ! Il est intéressant de noter que l'acronyme de ce qui est maintenant considéré comme le modèle standard de la cosmologie, Λ CDM (pour Λ , la constante cosmologique, CDM, la Matière Sombre Froide) répond exactement aux exigences que nous venons d'énoncer.

5.2 Du scénario de l'inflation primordiale au nouveau modèle standard de la cosmologie

Pour éviter la singularité du big bang dans le modèle cosmologique, le scénario dit de l'*inflation primordiale* consiste en une phase d'expansion exponentielle de la taille de l'univers primordial durant un temps suffisant et faisant croître toutes les échelles spatiales de telle sorte que les trois problèmes énoncés puissent être résolus. D'après ce scénario, la singularité du big bang serait évitée si l'origine de la phase d'inflation était une *fluctuation du vide quantique* (apparition d'une paire particule-antiparticule presque immédiatement suivie par sa disparition) signifiant qu'en quelque sorte, l'univers naîtrait spontanément à partir du néant ²⁴! Mais, en l'absence d'un véritable modèle standard de la cosmologie, ce scénario de l'inflation primordiale, que l'on pourrait assimiler à un éventuel noumène bachelardien en cosmologie, ne jouissait d'aucune crédibilité.

²⁴ Vilenkin, A., « Birth of Inflationary Universes », *Phys. Rev.*, Vol. 27, 1983, p. 2848.

5.2.1. Progrès observationnels

Ce n'est pas le moindre mérite du modèle Λ CDM que d'avoir validé ce scénario, mais pour passer de la cosmologie HBBM à la cosmologie Λ CDM, il a fallu résoudre une difficulté qui relève de la phénoménotéchnique du temps : comment rendre compte, de manière quantitative, du phénomène de l'expansion de l'univers ? Aux débuts de la cosmologie, on ne disposait, pour utiliser la loi établie par Lemaître liant vitesse de fuite à éloignement [§4-5 ci-dessus], que de l'observation des *céphéides*, dont l'éclat absolu et le spectre d'émission étaient assez bien connus, ce qui permettait d'évaluer leur distance et, grâce au rougissement de leur spectre (effet Doppler), leur vitesse d'éloignement et donc, la vitesse de l'expansion. Cette évaluation a été un peu améliorée avec l'observation de supernovæ de type IA, mais, ce qui a permis à la cosmologie de devenir pleinement quantitative c'est la mesure de plus en plus précise du rayonnement micro-onde de fond cosmologique (CMB pour Cosmic Microwave Background), réalisée en astrophysique spatiale avec les missions COBE, MICROWAVE et dernièrement Planck.

5.2.2. Progrès conceptuels

D'un point de vue plus conceptuel, il a fallu renoncer à l'hypothèse arbitraire de l'absence de constante cosmologique, et adopter l'option essentielle de la philosophie de Ferdinand Gonseth, qui est celle de *l'ouverture à l'expérience*, c'est-à-dire autoriser, dans les équations de la nouvelle cosmologie, la possibilité d'une constante cosmologique non nulle, et de s'en remettre, selon Bachelard, au verdict de l'expérience :

Par contre, c'est la réflexion qui donnera un sens au phénomène initial en suggérant une *suite organique* de recherches, une perspective rationnelle d'expériences. Nous ne pouvons avoir *a priori* aucune confiance en l'instruction que le donné immédiat prétend nous fournir. Ce n'est pas un juge, ni même un témoin ; c'est un accusé qu'on convainc tôt ou tard de mensonge.²⁵

Mais il fallait aussi comprendre, d'un point de vue mathématique, les liens qui peuvent exister entre les théories, dites de jauge, qui gouvernent les interactions fondamentales du modèle standard, et celle de la gravitation qui sous-tend la théorie générale de la relativité. Le schéma dit de la *dualité jauge-gravité* tente de répondre à cet objectif²⁶ : l'idée de cette dualité est que, lorsqu'elles sont traitées de façon pleinement quantique, les théories de jauge *renormalisables* du modèle standard peuvent induire des effets typiquement gravitationnels comme une constante gravitationnelle induite et/ou une constante cosmologique induite²⁷.

²⁵ Bachelard, G., *Noumène et microphysique*, cit., p. 17.

²⁶ De Haro, S., Mayerson, D.R., Butterfield, J.N., *Conceptual Aspects of Gauge/Gravity Duality*, *Found. Phys.* Vol. 46, 2016, 1341-1425.s

²⁷ Adler, S., *Einstein gravity as a symmetry breaking effect in quantum field theory*, *Reviews of Modern Physics*, Vol.54, 1982, 729 ; Erratum *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 55, 1983, 837.

5.2.3. Les acquis de la cosmologie Λ CDM

Très rapidement résumés, ces quatre acquis sont les suivants :

1. La redécouverte de la constante cosmologique ;
2. La validation du scénario de l'inflation primordiale ;
3. La concordance de toutes les méthodes utilisées pour mesurer les distances en cosmologie ;
4. La découverte d'une matière-monde à deux composantes appelées énergie *sombre* et *matière sombre* qui, à elles deux représentent plus de 95% du contenu de l'univers²⁸.

C'est cette dernière découverte qui a été et est toujours considérée comme très surprenante alors que, comme nous l'avons noté ci-dessus, déjà en 1917, de Sitter remarquait qu'à côté de la matière-monde, la contribution de la matière ordinaire au contenu total de l'univers était *utterly negligible* ! Mais, si l'interprétation de l'énergie sombre en termes d'effet de la constante cosmologique fait consensus, celle de la matière sombre est considérée comme l'un des problèmes les plus ardues rencontrés en cosmologie.

5.3. Irréductibilité et énergie au repos en géométrie anti de Sitter, la phénoménotechnique du temps en cosmogonie scientifique

Dans notre contribution au livre *Time and Science* dans laquelle on peut trouver les références de nos travaux en cours sur la matière sombre auxquels nous renvoyons le lecteur intéressé²⁹, nous évoquons la possibilité d'une cosmogonie scientifique qui soit compatible à la fois avec la relativité générale et avec la théorie quantique des champs qui prend en compte les deux constantes universelles, \hbar et c . Mais cette théorie, qui, en physique des particules, ne fonctionne en principe qu'à température et courbure spatiale nulles, doit être étendue pour être adaptée à la prise en compte des deux autres constantes universelles, que sont la constante de Newton G_N et la constante de Boltzmann k_B , auxquelles nous rajoutons Λ , la constante cosmologique que nous proposons de traiter, non pas comme un paramètre, mais comme une authentique constante universelle. La phénoménotechnique pluridisciplinaire que nous proposons pour cette cosmogonie scientifique consisterait donc à articuler, à combiner, trois sous-disciplines de la physique quantique et relativiste qui s'appuient chacune sur une théorie prenant en compte un quantum élémentaire :

- i) *La théorie quantique des champs* qui prend en compte le quantum élémentaire d'action \hbar ,

²⁸ Encore une remarque d'ordre terminologique : en anglais ces deux composantes sont appelées *dark energy* et *dark matter*. Nous pensons préférable de traduire l'adjectif *dark* par *sombre* plutôt que par *noir* qui convient mieux à l'adjectif *black* que l'on trouve dans *black hole* usuellement traduit en *trou noir*.

²⁹ GCT&JPG *Scientific cosmogony, the time in quantum relativistic physics*, In "Time in Science", Lestienne, R. and Harris, P. (co-editors.), World Scientific Publishing, 2023, Vol 3, Chapter 10.

ii) *La théorie quantique de l'information* qui prend aussi en compte le quantum d'information ou d'entropie, kB ,

iii) *Une théorie thermodynamique, donc quantique de l'espace-temps, encore à élaborer*, dont un quantum élémentaire pris en compte serait la constante cosmologique, Λ , que nous proposons d'interpréter comme un quantum de courbure.

Dans le cadre de cette articulation, on peut s'attendre d'une part à la *dualité du temps* c'est-à-dire qu'il y aurait deux temps complexes conjugués, le temps local (ou cinématique) t et un temps global τ , qui pourrait être le temps extra-mondain de de Sitter ou le temps *thermique* de Connes et Rovelli³⁰, et d'autre part au rôle des géométries de Sitter et anti de Sitter dans l'élaboration d'une théorie quantique d'un espace-temps comportant une température et une courbure non-nulles. C'est dans ce cadre que nous proposons d'interpréter la matière sombre comme un *condensat de Bose-Einstein de digluons dans une cinématique d'anti de Sitter*³¹. A l'appui de ce scénario, il est connu en physique des atomes ultra-froids³², selon laquelle la condensation de Bose-Einstein peut se produire dans la matière non condensée, mais également dans les gaz, que ce phénomène n'est pas lié aux interactions mais plutôt aux corrélations impliquées par les statistiques quantiques³³.

5.4. Le boson de Higgs, avatar moderne de l'atome primitif de Lemaître, le noumène de la cosmogonie scientifique

Quant au noumène de la cosmogonie, nous proposons de le trouver dans les théories de jauge sur réseau, dont nous avons dit plus haut (§ 3-2) qu'elles ignorent le temps, mais à condition de les généraliser de façon à ce qu'elles puissent inclure une dimension temporelle. La théorie de jauge sur réseau de la physique des particules ignore le temps parce que le réseau, qui tient lieu d'espace-temps, n'est pas *dynamique*. Pour faire des variables spatio-temporelles, des variables dynamiques, il convient de considérer un *réseau aléatoire*. C'est ce que proposent T.D. Lee et ses collaborateurs, dans *Gauge theory on a random lattice*³⁴.

L'hypothèse de l'atome primitif de Georges Lemaître est une véritable intuition cosmogonique géniale : si l'univers *fini* qui nous est observable parce que

³⁰ Connes, A.; Rovelli, C. *Von Neumann Algebra Automorphisms and Time-Thermodynamics Relation in General Covariant Quantum Theories*. Class. Quant. Grav. 1994, 11, 2899-2918.

³¹ Cohen-Tannoudji G., Gazeau, J.-P., « Cold Dark Matter: A Gluonic Bose-Einstein Condensate in Anti-de Sitter Space Time », *Universe* 2021, Vol. 7, n°11, p. 402.

³² Atomes ultra-froids.

³³ Voir la note en bas de page sur l'intrication dans le §3. On pourrait dire aujourd'hui « intriqués », comme peuvent l'être des caractéristiques internes, e.g. spin, sans localisation spatiale. L'outil mathématique nécessaire à leur prise en compte est le produit tensoriel d'espaces vectoriels, une notion loin d'être évidente et trop souvent occultée dans les présentations (grand public ou même public averti) des subtilités du formalisme quantique. La maîtrise de cet outil est pourtant fondamentale pour comprendre l'intrication quantique. Cohen-Tannoudji, G., Gazeau, J.-P., *Dark matter as a QCD effect in an anti de Sitter geometry: Cosmogenic implications of de Sitter, anti de Sitter and Poincaré symmetries*. SciPost Phys. Proc. 14, 004 (2023).

³⁴ Christ, N. H., Friedberg, R., Lee, T.D., « Gauge theory on a random lattice », *Nuclear Physics B*, Vol. 210, n°3, 1982, pp. 310-336.

mesurable³⁵, est en expansion, avec des constituants s'éloignant les uns des autres à des vitesses proportionnelles à leur éloignement, et si par la pensée, on remonte le temps, on est obligé d'imaginer qu'à l'origine, tout le contenu de cet univers était rassemblé dans un volume infinitésimal, celui d'un unique "atome" et, donc, comme le dit Ferdinand Gonseth dans sa préface, « l'hypothèse de l'atome primitif revêt un certain caractère de nécessité »³⁶.

Mais selon l'état des connaissances à l'époque où cette hypothèse avait été formulée, elle a conduit Lemaître à imaginer que toute la masse de l'univers était concentrée dans un "gigantesque isotope du neutron" ! Mais cette image ne correspond absolument plus à celle que l'on se fait maintenant, d'un univers émergent, sans coût énergétique, d'un vide quantique de masse gravitationnelle active nulle. Autrement dit, c'est plutôt du côté de la théorie quantique des champs du modèle standard de la physique des particules qu'il est peut-être préférable de rechercher un possible candidat "atome primitif". Or, dans ce modèle standard, à côté des champs dits "*de matière*", les *leptons chargés*, les *neutrinos* et les *quarks*, qui sont tous des fermions de spin 1/2 et des champs dits "*de jauge*", photon, les bosons W et Z de l'interaction faibles et les *gluons*, les champs de jauge de la chromodynamique quantique (QCD), qui sont tous des bosons de spin 1, existe un autre champ quantique, dont le quantum, le très célèbre *boson de Higgs*, qui a les nombres quantiques du vide, (spin 0, charge nulle dans toutes les théories de jauge du modèle standard) qui peut donc être considéré comme un champ quantique associé à la métrique de l'espace-temps, que l'on peut traiter *comme un réseau aléatoire*. En fait, ce boson de Higgs est la véritable clé de voûte de tout le modèle standard, c'est lui, dont nous pensons qu'il peut jouer le rôle de l'atome primitif de Lemaître³⁷ :

L'article de Gilles Cohen-Tannoudji et Jean-Pierre Gazeau propose la fondation d'une nouvelle cosmogonie, qui serait compatible à la fois avec la relativité générale et avec la théorie quantique des champs. Les éléments de cette cosmogonie ne sont pas des particules et leurs événements, mais des champs quantiques, et les interprétations de ces deux théories qu'elle suggère est une interprétation informationnelle, tout à fait conforme à l'évolution moderne de l'interprétation de la mécanique quantique. Dans cette théorie, compatible avec le Modèle Λ CDM (modèle standard incluant la matière noire froide et la constante cosmologique Λ) et impliquant les cinématiques de Sitter et anti de Sitter, les constantes fondamentales incluraient, en plus des habituels \hbar , G et c, la constante cosmologique Λ comprise comme un quantum de courbure, et la constante de Boltzmann k_B comprise comme un quantum d'entropie. Dans cette approche, le temps devient plus complexe, du moins au sens mathématique. On retrouve le temps global τ (thermique) de Connes et Rovelli, qui se présente comme le complexe conjugué du temps local. Mais c'est le temps τ qui est fondamental, à la base de l'évolution de l'univers. *Last but not the least*, le modèle esquissé propose d'interpréter la matière noire simplement comme étant liée aux gluons, « un Condensat de Bose-Einstein dans une cinématique

³⁵ Le fini est, par essence, mesurable. L'infini, lui, comme d'ailleurs tout nombre irrationnel, est incommensurable !

³⁶ Op. cit. Ferdinand Gonseth Préface à *L'hypothèse de l'atome primitif de Georges Lemaître*

³⁷ Voir les figures 1 et 2.

anti de Sitter», alors que l'énergie sombre pourrait être liée aux neutrinos... Tout cela dérivant du boson de Higgs, qui pourrait être considéré comme l'avatar moderne de l'atome primitif de Lemaître.³⁸

6. Conclusion, la philosophie de Gonseth vue par Bachelard

C'est en introduction d'une rencontre organisée à l'occasion du soixantième anniversaire de Ferdinand Gonseth que Gaston Bachelard s'est exprimé à propos de l'idonéisme, la philosophie de Ferdinand Gonseth dont nous extrayons, à titre de conclusion, les quelques phrases suivantes :

L'idonéisme, par système, doit être un absolu modernisme. Il a la redoutable fonction de la modernité. Sans cesse il devra être mis à jour. C'est une philosophie du courage intellectuel. Et voilà bien pourquoi on peut en faire le point en négligeant la tâche inutile d'en faire un résumé. [...] On oublierait un des thèmes les plus actifs de la philosophie gonsethienne si l'on ne signalait pas sa position vis-à-vis des valeurs intuitives. Là encore, tout est nuance. Il faut installer l'idonéisme dans une « dialectique idoine du concret et de l'abstrait » (cf. *La Géométrie et le Problème de l'Espace*, IV, p. 47). Et l'intuition restera toujours une nourriture concrète que l'exactitude abstraite devra assimiler. Dans *Les Fondements des mathématiques* (p. 105), Gonseth disait déjà : « Dans toute construction abstraite, il y a un résidu intuitif qu'il est impossible d'éliminer. » Serait-il même utile d'éliminer ce résidu intuitif ? Ne se reformerait-il pas de soi-même ? Ne tient-il pas à la nature même de l'esprit humain ? En élevant le débat, si la connaissance est un essentiel et constant ajustement de la nature de l'esprit et de la nature des choses, on voit bien que les dialectiques du concret et de l'abstrait – de l'intuition et de la rigueur – de l'expérimental et du rationnel sont des dialectiques motrices, dès l'instant où elles transcendent la stérile logique des oppositions. On atteint alors à cette synthèse dialectique qui est, comme dit Gonseth (loc. cit., p. 76), '*le rythme même du progrès scientifique*'.³⁹

Gilles Cohen-Tannoudji

Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (LARSIM, CEA, Université de Paris-Saclay)

Gilles.cohentannoudji@gmail.com

Jean-Pierre Gazeau

Astroparticule et Cosmologie, Université Paris Cité, CNRS, F-75013, Paris, France
gazeau@apc.in2p3.fr

³⁸ Commentaire fait par Rémy Lestienne, co-éditeur du livre *Time and Science*, dans lequel figure notre contribution GCT&JPG *Scientific cosmogony, the time in quantum relativistic physics*.

³⁹ Bachelard, G., *L'idonéisme ou l'exactitude discursive*, in *Etudes de philosophie des sciences*, en hommage à Ferdinand Gonseth, Neuchâtel, Éditions du Griffon, 1950.

Figures

Gilles Cohen-Tannoudji, Jean-Pierre Gazeau

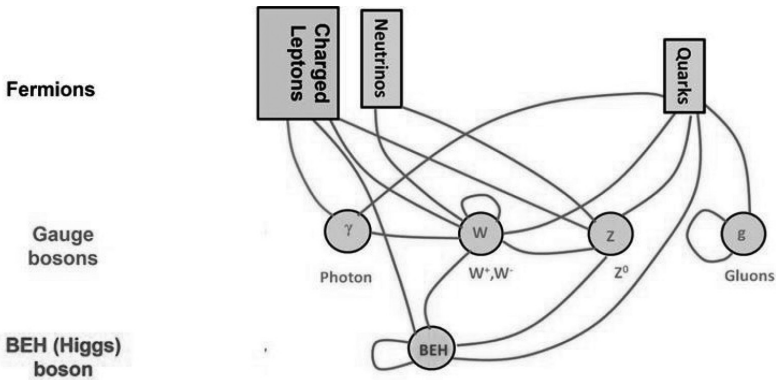


Figure 1

Le boson BEH (Higgs) comme clé de voûte du Modèle Standard : Les lignes bleues représentent les couplages des différents champs, ceux couplés au BEH, dont le BEH lui-même acquièrent de la masse grâce au mécanisme BEH ; ceux qui n’y sont pas couplés restent sans masse ou conservent leur masse le cas échéant

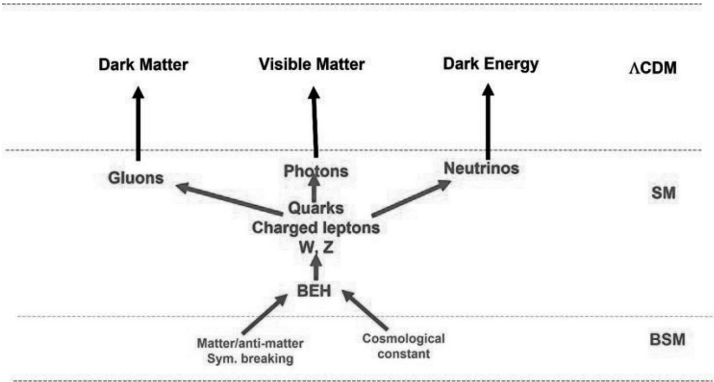


Figure 2

Illustration schématisée de l’adéquation du modèle standard de la physique des particules (SM) et du modèle standard cosmologique (Λ CDM), grâce à une hypothèse minimale « au-delà des modèles standards » (BSM).

Olga Pombo

Science et école chez Bachelard. Discontinuité et nouveauté

Penseur profond et écrivain admirable, Bachelard nous a laissé une œuvre multiple, qui se déploie à travers plusieurs voies, allées, avenues : la philosophie des sciences, l'épistémologie, la critique littéraire, l'histoire des sciences, la phénoménologie de l'imagination, la psychanalyse, la poésie... Deux directions fondamentales ont été soulignées dans ses travaux. D'un côté, des œuvres d'analyse et théorisation de l'activité scientifique où Bachelard construit une conception ultra-rationaliste de la science ; de l'autre côté, des œuvres fortement littéraires sur la rêverie, l'imagination, la poétique.

Il y a donc, apparemment, un Bachelard double : un rationaliste acharné et un rêveur poète ; un « travailleur de la preuve » et un « travailleur de la phrase »¹. On a même parlé de « deux Bachelard », diurne et nocturne², un « Janus bifrons »³. Et Bachelard lui-même assume avec une étonnante clarté sa nature androgyne. « Si je devais résumer une carrière irrégulière et laborieuse, marqué par des livres divers, le mieux serait de la mettre sous les signes contradictoires, masculin et féminin, du concept et de l'image »⁴. Quelqu'un qui, pendant le jour, fait des recherches raisonnables avec ces « instruments de la pensée »⁵ que que sont les concepts, et qui, quand la nuit tombe, devient « rêveur de mots »⁶, quelqu'un qui joue avec ces « enfants de nuit » que sont les mots⁷.

Or il y a encore une autre dimension de l'œuvre de Bachelard à laquelle moins d'attention a été donnée – la question du temps – mais à laquelle Bachelard a consacré deux œuvres, toutes deux publiées dans les années 30 – *L'Intuition de l'instant* (1932) et *La Dialectique de la durée* (1936). Deux petites œuvres par le

¹ Bachelard le dit à propos de Valéry, Bachelard, G., *La Poétique de la rêverie*, Paris, PUF, [1960] 1986, p. 42.

² Cf. Lecourt, D., *Bachelard. Le jour et la nuit*, Paris, Grasset, 1974. Voir aussi le beau texte de Jean Starobinski, « La double légitimité », *Revue internationale de philosophie*, n° 150, 1984, pp. 231-244, dédié à la description du dualisme, de la double enquête, du bilinguisme bachelardien.

³ Granger, G.G., « Janus bifrons », *Revue internationale de philosophie*, n° 150, 1984, p. 257-271.

⁴ Bachelard, G., *La Poétique de la rêverie*, op. cit., p. 45.

⁵ Bachelard, G., *Ibidem*, p. 30.

⁶ *Ibidem*, p. 15.

⁷ *Ibidem*, p. 30.

nombre des pages qui, pourtant, proposent une métaphysique du temps assez rare. Elle se fait, explicitement contre Bergson, à partir du concept de l'instant⁸, ou, comme le disait Platon, de « cette étrange chose qui se trouve hors de tout temps » (*Parménides* 156d).

Pourtant, la philosophie du temps de Bachelard est aussi marquée par la duplicité. Même si ses thèses radicalement discontinuistes sur le temps doivent être pensées surtout face aux développements de la physique contemporaine⁹, c'est-à-dire, dans le contexte du travail épistémologique de Bachelard, il faut aussi ne pas manquer de reconnaître la dimension poétique des méditations de Bachelard sur ces « atomes de solitude »¹⁰ que sont les instants. Peut-être pourrions-nous alors mieux comprendre comment la production de nouveauté est possible dans la science, aussi bien que dans la vie. Dans les deux cas, la nouveauté est possible car le temps est fait d'instant atomiques, intensifs, toujours inauguraux, suspendus entre deux vides, séparés par des interstices dans lesquels l'inventivité opère, des fentes libres où le nouveau peut être conquis. De telle sorte que la durée, en tant que poussière d'atomes temporels, vient finalement à être déterminée comme création humaine : c'est nous qui avons la chance de déterminer nos instants en tant qu'événements de notre présent et de notre futur. C'est pour ça que, en commentant Rounpel, Bachelard peut dire aux dernières phrases de *L'Intuition de l'instant* : « C'est parce qu'on aime et qu'on souffre que le temps se prolonge en nous et qu'il dure »¹¹.

Face à ce Bachelard androgyne, savant et poète, on a beaucoup discuté sur l'unité de sa pensée. Est-ce que la duplicité de son œuvre nous met devant une énorme capacité créatrice qui ne peut pas se renfermer dans un chemin linéaire, ou, au contraire, est-elle la marque d'un sujet irréductiblement divisé¹² ? Est-ce que les deux grandes directions de sa pensée courent, côte à côte, comme des chemins irréductibles, des parallèles qui ne se croisent jamais ? Ou, sont-elles complémentaires, pouvant coexister, paisiblement, s'entrecroiser de façon féconde et riche ? Ou, encore, est-ce qu'il y a une unité profonde qui traverse les directions fondamentales de son œuvre ? Et, dans ce cas, où réside cette unité ?

⁸ Bachelard dira que « l'instant est l'élément temporel primordial », (Bachelard, G., *L'Intuition de l'instant*, Paris, Gonthier, [1932] 1971, p. 15).

⁹ Notamment, comme c'est le cas des autres contributions de ce volume, en interrogeant les implications de la relativité et de la physique quantique dans la déconstruction du temps, ou en cherchant à savoir comment la science phénoménoteknique (capable de fabriquer les phénomènes qui constituent notre réalité objective) fabrique le temps dans lequel nous vivons à partir de la définition des unités de mesure du temps : le temps atomique international.

¹⁰ L'expression est utilisée par Zbigniew Kotowicz, dans son livre, *Bachelard 50 ans après*, Lisbonne, CFCUL, 2016, p. 139.

¹¹ Bachelard, G., *L'Intuition de l'instant*, op. cit., p. 93.

¹² Dans une lettre à Martin Buber du 27 Janvier 1938, Bachelard écrit : « Ma fille va achever sa licence en philosophie. Elle devra choisir lettres ou sciences. A moins qu'elle ait la même infortune que moi que je n'ai jamais pu choisir », cité par Dominique Bourel, « De Bar-sur-Aube à Jérusalem, La correspondance entre Gaston Bachelard et Martin Buber », *Revue internationale de philosophie*, n° 150, 1984, p. 207.

On peut bien accepter, avec d'autres lecteurs de Bachelard, qu'il y a une unité de l'œuvre de Bachelard¹³. Pourtant, chez Bachelard, unité ne veut pas dire uniformité, conformité, linéarité. Même s'il y a unité, il y a aussi des dérapages fréquents d'une dimension sur l'autre, des transgressions frontalières, des escapades, des glissements¹⁴. Comme l'observe Gilles G. Granger, le style bachelardien est toujours celui d'une « organisation 'en étoile' de l'analyse, une organisation centrée qui s'éloigne de divers côtés de son point de départ pour ensuite y revenir »¹⁵. L'œuvre de Bachelard est pleine de contaminations transversales, de lignes de fuite croisées, de petites et secrètes trahisons. L'épistémologie envahit l'espace littéraire aussi bien que la poésie envahit l'analyse de la science.

En étant un défenseur de la discontinuité qu'il découvre (en pionnier) au cœur de l'histoire des sciences et qu'il prolonge dans sa métaphysique du temps faite d'instant isolés, séparés les uns des autres, des « atomes temporels », « suspendus entre deux néants »¹⁶ ; en étant un penseur de la rupture entre raison et imagination, intelligence et sensibilité, idées et images ; en étant un « rationaliste du contre »¹⁷, contre l'opinion, contre l'animisme, contre l'évidence première, contre les apparences, contre l'habitude ; en étant même l'inventeur de la « catégorie philosophique inédite du Non »¹⁸, défenseur de la victoire du construit sur le donné, du spéculatif sur l'expérientiel, du complexe sur le simple, de l'artificiel sur le naturel, etc., Bachelard, dans son écriture, dans sa pratique langagière, au-delà de la recherche d'un vocabulaire raisonnable et expressif pour l'analyse de la science, se laisse aller dans la continuité des enchantements posés par les mots, fait des déplacements imprévus du terrain des concepts vers celui des images. Contre la scission kantienne entre raison et sensibilité, cette fois, Bachelard est du côté de la « continuité » Leibnizienne et du « devenir » Deleuzien.

Une question peut maintenant se poser. Quel rôle jouent dans l'épistémologie de Bachelard les pages très belles, admirables, émouvantes qu'il écrit sur la figure de l'école, sur l'étude, sur le livre, sur le professeur, sur l'étudiant ? On sait que Bachelard a dédié un chapitre d'une de ses œuvres majeures, *Le Rationalisme Appliqué* (1949), au « Rationalisme enseignant et enseigné », qu'il a défendu que

¹³ Depuis le texte de Georges Canguilhem, « Sur une épistémologie concordataire » dans le volume *Hommage à Gaston Bachelard. Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, 1957, p. 3-12, que l'unité de l'œuvre de Bachelard a été soulignée. Voir aussi François Dagognet, « Le problème de l'unité », *Revue internationale de philosophie*, n° 150, 1984, pp. 245-256, et, plus récemment, Vincent Bontems pour qui le noyau unifiant de l'œuvre de Bachelard est sa « conception dynamique de l'esprit » (Bontems, V., *Bachelard*, Paris, Les Belles Lettres, 2010, p. 22).

¹⁴ Écoutez un passage enregistré par Jean Lescure dans sa belle « Introduction à la poétique de Bachelard », in Bachelard, G., *L'intuition de l'instant*, Paris, Gonthier, [1932]1971, p. 113-149 : « J'ai toujours eu deux métiers... [dans un de ces métiers], je ne veux pas me laisser rêver. Il faut qu'un poète vienne, comme cela, sur ma table. Alors, j'oublie mon travail... Me voilà parti à aimer l'image. Et cet amour, je le glisse dans les livres », *Ibidem*, p. 133 (je souligne).

¹⁵ Granger, G.G., « Janus Bifrons », *Revue internationale de philosophie*, n° 150, 1984, p. 270.

¹⁶ Bachelard, G., *L'intuition de l'instant*, op. cit., p. 13.

¹⁷ Bachelard, G., *Le Rationalisme appliqué*, Paris, PUF, 1949, p. 15.

¹⁸ Lecourt, D., « De Bachelard au matérialisme historique », *L'Arc*, n° 42, 1970, p. 6.

« l'homme adonné à la culture scientifique est un éternel écolier »¹⁹. On sait qu'il s'est défini lui-même comme « plus professeur que philosophe »²⁰. Et on sait aussi qu'à la fin de sa vie, quand il récapitule sa trajectoire, il n'hésite pas à avouer : « je ne suis que le sujet du verbe étudier. Penser je n'ose. Avant de penser, il faut étudier »²¹. Le fait est que, dans un registre parfois ostensif, d'autres fois explicite, quelquefois quasiment imperceptible, des fois disséminée dans des lieux inattendus, on voit se dessiner, tout au long de l'œuvre épistémologique de Bachelard, ce qu'on pourrait appeler une « poétique de l'école ». La question peut donc se formuler comme ceci : est-ce que cette poétique de l'école n'est pas une de ces lignes de fuite dont on a parlé auparavant ? Est-ce qu'il ne s'agit pas seulement d'une de ses escapades, explicables par des raisons biographiques – ses belles expériences en tant que professeur, d'abord dans sa ville natale, puis à la faculté de lettres de Dijon, et après à la Sorbonne – ou par des raisons historiques et politiques, notamment grâce à l'essor de l'école républicaine après les lois de Jules Ferry sur l'enseignement public en 1882 ?

Mon hypothèse consiste, au contraire, à prendre au sérieux la centralité du concept de l'école dans l'épistémologie de Bachelard. L'école – de l'école primaire à l'université – est une dimension constitutive de l'épistémologie de Bachelard où elle opère un travail secret, intime et matriciel. Bien au-delà des implications pédagogiques de son épistémologie²², il s'agit de mettre en relief la relation éminemment cognitive entre la Science et l'École chez Bachelard.

C'est vrai que cette relation a été pensée par d'autres philosophes des sciences. Depuis Auguste Comte jusqu'à Thomas Kuhn, le rôle de l'école dans la construction de la science a été l'objet d'une attention spécifique²³. Mais c'est Bachelard qui offre la théorisation la plus élaborée et féconde de cette relation. L'École n'est pas seulement le lieu du développement systématique des structures cognitives des étudiants (Piaget), de l'élargissement de l'imagination et de la construction de l'esprit critique des futurs scientifiques (Popper), ou de la transmission des bases axiomatiques et des méthodes de travail paradigmatiques que le futur pratiquant de la science normale doit acquérir (Kuhn). Au-delà des fonctions psychologiques et méthodologiques que Piaget, Popper ou Kuhn lui attribuent, l'école joue pour Bachelard un rôle beaucoup plus décisif comme l'ont souligné quelques études récentes. C'est le cas de Didier Gil²⁴ et Vincent Bontems qui vont même jusqu'à

¹⁹ Bachelard, G., *Le Rationalisme appliqué*, op. cit., p. 23.

²⁰ *Ibidem* p. 12.

²¹ Bachelard, G., *La Flamme d'une chandelle*, Paris, PUF, 1961, p. 55.

²² Notamment, la notion d'obstacle épistémologique a fait fortune dans les milieux pédagogiques en France et aux EUA, en ayant un impact direct dans ladite « pédagogie des conceptions alternatives ». Cf. Pombo, O., « Bachelard et la cité savante », in Bontems, V., (dir.), *Bachelard et l'avenir de la culture. Du surrationalisme à la raison créative*, Paris, Presses des Mines, 2018, p. 109-120.

²³ Sur ce sujet, cf. aussi Pombo, O., « Bachelard et la cité savante », in Bontems, V., (dir.), *Bachelard et l'avenir de la culture. Du surrationalisme à la raison créative*, Paris, Presses des Mines, 2018, p. 109-120.

²⁴ Gil, D., *Bachelard et la culture scientifique*, Paris, PUF, 1993.

dire que l'école est le concept central de la conception dynamique de l'esprit chez Bachelard, « la matrice de sa réflexion sur la dynamique de l'esprit »²⁵.

Pour ma part – c'est justement cela que je veux défendre – l'École est le concept central de son épistémologie. Elle est au cœur de la constitution de la science même, comme le lieu « nécessaire » à la croissance et au progrès des connaissances scientifiques. On sera alors en mesure de comprendre comment l'École, en tant que garante de la production de nouveauté scientifique, ne peut s'inscrire que dans une métaphysique du temps discontinu. À moi donc d'enchaîner quelques propos démonstratifs. Voyons.

1. Pour Bachelard il n'y a pas un cogito initial, ni constitué, ni constituant

« Quand il se présente à la culture scientifique, l'esprit n'est jamais jeune. Il est même très vieux. Il a l'âge de ses préjugés »²⁶. Bachelard dira qu'il faut faire une opération d'élimination de ces erreurs pertinentes, persuasives, persistantes, insidieuses, séduisantes. Mais, contrairement à Descartes, cette opération n'est jamais radicale. Disons que Bachelard est ici entièrement d'accord avec Leibniz, le grand opposant de Descartes : il faut se méfier des évidences premières. Il y a toujours un fond obscur – confus, dirait Leibniz, résistant, tenace, dirait Bachelard – qu'on doit, continuellement, continuer de clarifier. C'est à dire, le sujet immaculé, pur et sain n'existe pas. L'erreur ne peut pas être absolument éradiquée. Au contraire du doute méthodique de Descartes, la psychanalyse de Bachelard est interminable. Elle ne permet pas un retour à l'évidence première. Ce qu'elle permet c'est que le sujet puisse accéder à la productivité d'une « philosophie du 're', 're', 're', 're-commencer', 're-nouveler', 'ré-organiser' »²⁷. C'est pour cette raison qu'« accéder à la science, c'est spirituellement rajeunir »²⁸. Mais, rajeunir n'est pas naître à nouveau. Notre bateau doit se « re-faire » en haute mer, sans pouvoir jamais accoster à un port sûr, comme le dira Otto Neurath dans un tout autre horizon philosophique mais, à peu près, dans le même moment²⁹. Autrement dit, dans les sciences, à une stratégie fondationaliste de type cartésien, Bachelard oppose le dynamisme fécond d'une raison dialogique, polémique.

²⁵ Bontems, V., *Bachelard*, Paris, Les Belles Lettres, 2010, p. 24.

²⁶ Bachelard, G., *La Formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, [1938] 1993, p. 14.

²⁷ Bachelard, G., *L'Engagement rationaliste*. Paris, PUF, 1972, p. 50 (c'est nous qui soulignons).

²⁸ Bachelard, G., *La Formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, [1938] 1993, p. 14.

²⁹ "Imagine sailors who, far out at sea, transform the shape of their clumsy vessel from a more circular to a more fishlike one. They make use of some drifting timber, besides the timber of the old structure, to modify the skeleton and the hull of their vessel. But they cannot put the ship in dock in order to start from scratch", Neurath, O., *Foundations of the Social Sciences*, Chicago, University of Chicago Press, 1944, p. 47.

2. Bachelard s'oppose aussi au « projet solitaire du *cogito* cartésien »³⁰. Le *cogito* est un *cogitamus*

Le sujet ne se fait qu'en discutant. La vérité ne se donne pas, ni se construit, dans le *cogito* solitaire. Elle suppose l'opposition, la controverse, la parole adressée à l'autre, la circulation du discours dans une communauté de sujets raisonnables. Toujours, le bon matin, Socrate sortait pour se promener et disputer avec quiconque le croisait dans les rues d'Athènes. Calias offrait sa riche maison pour y recevoir les discussions avec les grands sophistes. Platon a fondé l'Académie dans une ville cosmopolite, où l'alphabétisation³¹ et la démocratie rendaient possible et désirable que tous puissent discuter. Le jardin d'Épicure était plein d'amis philosophes. L'université médiévale a inventé la *disputatio* et le *quodlibet*. La science moderne a répété le geste platonicien en créant des Académies partout. Et le café du XVIII^e a été inventé pour qu'on puisse y discuter librement...³² Ce ne sont que des exemples historiques de la nature constitutivement dialogique, polémique de la raison et du nouveau type de connaissance qu'elle permet de construire. Comme le disait Schleiermacher dans une formulation cristalline :

Le premier principe de tout effort de connaissance est celui de la communication et, étant donné l'impossibilité de produire quoi que ce soit, ne serait-ce que pour nous-mêmes, sans langage, la nature elle-même a formulé sans équivoque ce principe. C'est pourquoi toutes les relations nécessaires à la réalisation fonctionnelle de la connaissance ainsi que les diverses formes de communication et d'interaction entre les diverses activités devront être constituées à partir de l'impulsion pure de la connaissance.³³

Car la construction de la connaissance implique toujours, à sa racine, le langage en tant que communauté de sens et d'expérience, la connaissance est, par sa nature même, rayonnante, spontanément diffusive, communicative. Ça veut dire que l'homme de science n'est jamais seul. À chaque moment de l'activité scientifique,

³⁰ J'emprunte cette belle formulation à Vincent Bontems, *Bachelard*, Paris, Les belles lettres, 2010, p. 68.

³¹ Comme le montrent les recherches des oralistes, tels que M. Macluhan, J. Goody, Walter J. Ong or E. Havelock, seulement dans un monde déjà alphabétisé, qui donc est déjà sorti les relations d'autorité de l'ainé caractéristiques de l'oralité, la discussion devient possible. Cf, par exemple Havelock, E., *The Muse learns to write*, New Haven, Yale University Presse, 1986.

³² Depuis les pays arabes, le café arrive en Europe au début du XVII par la main des commerçants italiens. En 1669, l'italien Francesco Procope a fondé à Paris le premier café, le célèbre Procope, où disputaient Rousseau, Voltaire, Diderot et d'autres écrivains, philosophes, poètes, musiciens. Sur le rôle communicatif et cognitif du café, cf. Habermas, J., *Strukturwandel der Öffentlichkeit. Untersuchungen zu einer Kategorie der bürgerlichen Gesellschaft* (1962), traduction française de M.B. de Launay, « *L'espace public. Archéologie de la publicité comme dimension constitutive de la société bourgeoise* », Paris, Payot, 1993.

³³ F. Schleiermacher, F., « *Gelegentliche Gedanken über Universitäten in deutschem Sinn* » (1808), traduction française de André Laks, « *Pensées de circonstance sur les Universités de conception Allemande* », in L. Ferry, J. P. Person et A. Renault (eds.), *Philosophies de l'université. L'idéalisme allemand et la question de l'université*, Paris, Payot, 1979, p. 258.

nous sommes toujours exposés au dialogue avec quelqu'un qui est proche ou lointain, et qui a souvent la forme visible d'un maître, d'un collègue, d'un disciple.

La thèse est sérieuse. Bachelard se positionne contre toute une tradition réflexive, méditative, monologique, en s'inscrivant, au contraire, dans une tout aussi longue tradition (socratique) selon laquelle le sujet peut se « constituer comme rationalité »³⁴ seulement par la discussion. Comme il l'écrit dans *La formation de l'esprit scientifique* : « Il ne suffit pas à l'homme d'avoir raison. Il faut qu'il ait raison contre quelqu'un »³⁵. La présence de l'autre est absolument nécessaire. Pas pour « recevoir » de l'autre, pas pour « échanger » des vues. Pas même pour « faire converger » les opinions. La convergence d'opinions est ce qui caractérise la connaissance commune, obstacle qu'on doit surmonter le plus vite possible. La présence de l'autre est nécessaire pour qu'on puisse « opposer » nos idées, nos thèses, nos hypothèses et, peut-être, du cœur de cette opposition, faire naître de nouvelles raisons. Seulement face à l'autre, il peut se déclencher une vraie discussion avec les éléments agonistiques nécessaires à encourager l'enthousiasme et la vigueur de cette éristique. Comme Bachelard disait à la fin de *La Philosophie du Non*, « La vérité est fille de la discussion ». Et il ajoutait : « non pas fille de la sympathie »³⁶.

La présence de l'un dérange les raisons de l'autre. Tous les deux sont perturbés par les difficultés qui se présentent. Cette perturbation a bien sûr des éléments émotionnels, mais elle fonctionne aussi comme un stimulateur rationnel. Bachelard explique ce mécanisme complexe dans le *Rationalisme Appliqué* dans un passage subtil : « un sujet se pose en s'opposant à un autre sujet »³⁷. Et il ajoute : « Cette opposition peut être entièrement *rationnelle* »³⁸. Ce qu'il est important de noter, c'est que Bachelard ne dit pas que cette opposition « est » mais seulement qu'elle « peut être » entièrement *rationnelle*. C'est-à-dire, elle peut aussi « ne pas être » entièrement rationnelle car, bien sûr, elle comporte des investissements émotionnels très forts. Pourtant, ce que Bachelard veut dire fondamentalement c'est que le face à face agonistique des personnages n'empêche pas – au contraire, stimule – l'opposition qui « peut ne pas être » mais qui, finalement, « doit être » entièrement rationnelle. Pourquoi ? Parce que de cette opposition découle de la volonté de savoir commune qui anime la lutte entre les deux opposants. Ni l'un ni l'autre ne sont là pour vaincre. Les deux veulent savoir. Les deux cherchent des nouvelles raisons. L'éristique se métamorphose en heuristique. Bachelard le dit exactement avec ces termes dans *La dialectique de la durée*. « Il y a toute une éristique à la base de l'heuristique »³⁹.

³⁴ Bachelard, G., *Le Rationalisme appliqué*, op. cit., p. 11.

³⁵ Bachelard, G., *La Formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, [1938]1993, p. 245.

³⁶ Bachelard, G., *La Philosophie du non*, Paris, PUF, [1940], 1975, p. 134.

³⁷ Bachelard, G., *Le Rationalisme appliqué*, op. cit., p. 21.

³⁸ *Ibidem*.

³⁹ Bachelard, G., *La Dialectique de la durée*, Paris, PUF, [1950], 1980, p. 56.

3. Or, l'école est l'opérateur de cette éristique particulière où la raison se construit

Olga Pombo

Déjà avec son architecture. Avec ses salles de classe, ses amphithéâtres, ses lieux de séminaire, l'école est l'espace – le champ, le terrain de lutte, l'*agora* – où peut se développer cette éristique. Dans l'espace scolaire s'est développé un « ordre des lieux » qui a été – et est encore – le modelé de tant d'autres espaces de discours⁴⁰. Une architecture qui est ordonnée par trois principes fondamentaux : la facilitation de l'attention, la concentration des intelligences, et la prédisposition à la discussion. Dans tous ces cas, ces espaces sont habités par des opposants (les parlementaires, le juge et l'accusé, le conférencier et le public, etc.). Dans le cas de l'école, le maître et l'élève sont les deux opposants dont le destin est, justement, la protagonisation de cette éristique. Par leur définition même, le maître et l'élève, professeur et étudiant, sont différemment situés face à la connaissance. Ils sont autres, discontinus, inégaux, par l'âge, par leurs positions dans l'ordre du discours, par leurs statuts académiques, par la direction de leurs regards, etc. Ils sont là, tous les deux, face à face, préparés pour l'opposition. Leurs inégalités sont choisies, réclamées même⁴¹. Au contraire de ce qui se passe, par exemple, à la lutte ou la boxe où on choisit pour combattre deux opposants du même poids, ou à l'assemblée où les parlementaires ont des droits égaux devant la loi, à l'école, maître et élève se veulent inégaux. Et ils veulent s'opposer en tant qu'inégaux⁴².

Pourtant, quoique inégaux, le professeur n'est jamais le maître face à son esclave. Contre Hegel, Bachelard le dit explicitement en donnant l'exemple – parfait – de l'enseignement mathématique :

Alors que Hegel a si bien vu la dialectique du maître et de l'esclave dans le règne de la vie morale et de la vie politique, il n'a pas vécu cette communion dans la nécessité qui synthétise la dialectique du maître et de l'élève dans la culture mathématique. Dans une telle culture on ne peut dire que la construction soit imposée par le maître et que l'élève n'ait qu'à obéir. Du fait qu'on a découvert la raison profonde, la cause première d'un théorème, on transcende toutes les contingences de la simple constatation. On quitte l'empirisme de pensée pour le rationalisme de pensée.⁴³

C'est-à-dire, professeur et élève sont inégaux mais ils sont prêts à échanger leur rôle, le professeur devenant étudiant et l'étudiant devenant professeur. Il y a ici

⁴⁰ Voir l'isomorphisme entre la salle de classe, le salon de conférences, le parlement, le tribunal. Voir aussi l'architecture du théâtre grec et romain comme racine de l'amphithéâtre de l'université, notamment du théâtre anatomique.

⁴¹ Le juge aussi est inégal face à l'accusé. Mais le juge a toujours la raison de son côté. Et, il n'est pas là pour expliquer mais pour appliquer la loi.

⁴² Pour une confrontation de la dialectique du maître et de l'étudiant avec la dialectique du seigneur et de l'esclave hégélienne, cf. Lamy, J., « Le maître et l'élève dans l'enseignement rationaliste : une (re)lecture bachelardienne de la dialectique du maître et de l'esclave de Hegel », *Cahiers Gaston Bachelard*, 2010, URL : <https://hal.science/hal-01831320v1/document> (consulté le 10 octobre 2024).

⁴³ Bachelard, G., *Le Rationalisme appliqué*, op. cit., p. 98.

une immense différence vis-à-vis d'autres relations de pouvoir. Même s'il cultive une distance hiérarchique, statutaire, face à l'étudiant, le professeur n'est jamais le maître face à son esclave. Enseigner n'est pas imposer et apprendre n'est pas obéir. Le maître est distant. Du point de vue institutionnel, il occupe une position supérieure, éloignée, mais, en même temps, toujours très proche de la figure de l'étudiant, car, pour pouvoir enseigner il doit devenir lui-même étudiant. Pour qu'il puisse instruire l'étudiant, il doit s'instruire mieux lui-même, comprendre davantage, pénétrer encore, chercher, explorer, inventer de nouvelles formes explicatives qui lui permettront de dire autrement. C'est justement pour cela que, comme le dit Bachelard (en suivant le *dictum* de Brunschvicg), « enseigner c'est la meilleure façon d'apprendre »⁴⁴.

Inégaux mais inséparables, indissociables, professeurs et étudiants s'opposent dans un combat singulier qui ne se termine pas avec la victoire de l'un sur l'autre. Ils ne s'opposent pas pour vaincre. Pas même pour convaincre. Bien sûr, le maître est « un négateur des apparences »⁴⁵, quelqu'un qui bataille les « convictions rapides »⁴⁶ que l'étudiant tend à accepter trop vite, qui fait remarquer les inadéquations empiriques, les erreurs séduisantes. Le maître est celui qui va au-delà du positif, de l'immédiat, « de la simple constatation », celui qui « apporte des idées spéculatives »⁴⁷ pour essayer d'éclaircir les obscurités résistantes, de comprendre les difficultés constitutives des problèmes en cours d'analyse. Enseigner est donc, expliquer, dé-doubler les plis des difficultés, montrer et dé-montrer. Mais, pour que tout cela soit possible, le professeur doit lui-même comprendre mieux. Faire comprendre est équivalent à comprendre soi-même mieux. Voir et « donner à voir ».

L'objectif est de rencontrer des raisons qui puissent être aussi vues et reconnues par l'autre. C'est le célèbre « cogito d'obligation mutuelle » : « Je pense que tu vas penser ce que je viens de penser, si je t'informe de l'événement de raison que vient de m'obliger à penser en avant ce que je pensais »⁴⁸.

Il y a dans cette formulation du *cogito* d'obligation mutuelle présentée dans *Le Rationalisme Appliqué* (1949), plusieurs points magnifiques. J'en soulignerai seulement trois.

Le premier : comme le défendait Schleiermacher que j'ai mentionné plus tôt, Bachelard défend que « Le propre des événements de raison est d'être communicables »⁴⁹. Le deuxième : nous sommes tous obligés de penser en avant cet « événement de raison », c'est-à-dire, les nouvelles raisons que cette éristique particulière nous permet, soit de « rencontrer » (si on est plutôt Platonicien), soit de « produire » (si on est plutôt constructiviste).

Le troisième : il y a une objectivité du vrai. Les « événements de raison » que nous sommes tous obligés de penser sont des vérités douées d'universalité objec-

⁴⁴ Bachelard, G., *Le Rationalisme appliqué*, op. cit., p. 12.

⁴⁵ *Ibidem*, p. 21.

⁴⁶ *Ibidem*.

⁴⁷ *Ibidem*.

⁴⁸ *Ibidem*, p. 58.

⁴⁹ *Ibidem*, p. 44.

tive⁵⁰. Bachelard parle même d'une « ontologie de l'idée enseignée »⁵¹. Ce que le maître, aussi bien que l'étudiant cherchent tous les deux c'est une vérité objective, dé-subjectivée, désintéressée, impersonnelle, une vérité nécessaire que tous les deux (et tous les « autres possibles ») doués comme ils sont de raison et de volonté du vrai, reconnaîtront dès qu'ils la verront, dans sa splendeur apodictique. Voilà le fondement de la démonstration mathématique, science qui transporte avec soi, dans la racine étymologique du mot qui la désigne (*mathesis, mathemata*), la reconnaissance de l'école comme son origine et *topos* incontournable.

Bachelard ne le mentionne pas, ni ne l'évoque, ni ne le reconnaît. Mais, Platon, cet ultra-rationaliste qui a vécu il y a 2500 ans, est ici très proche : la vérité n'est pas dans le consensus rapide obtenu par la confrontation de diverses opinions, comme le pensait le sophiste, mais dans la reconnaissance par tous des « principes de nécessité »⁵². Le sophiste se trompe car la confrontation des opinions n'est pas vraiment éclairante, elle n'arrive pas à cette reconnaissance lumineuse. Pour arriver là, pour qu'on puisse contempler la beauté de cet « évènement de raison », il faut un travail long et approfondi du *cogitamus* (dans l'école et dans la communauté scientifique). Didier Gil le dit très bien : « Si *cogitamus* il y a, il ne peut être que la marque finale de l'apodicticité, non sa condition »⁵³.

L'école (aussi bien que le cogito d'obligation mutuelle qu'elle déclenche, qu'elle provoque, qu'elle incite), est donc aussi co-extensive à la cité scientifique. C'est-à-dire, l'école est la détermination structurante, le modèle même de la communication horizontale entre les pairs. Le travail scientifique suppose un patient apprentissage, un sacrifice constant des certitudes acquises, une éternelle révision critique. On comprend bien pourquoi « la culture scientifique met sans cesse un vrai savant en situation d'écolier »⁵⁴. L'homme de science est un éternel écolier, toujours prêt à désapprendre, et à apprendre à nouveau, à vérifier et corriger son erreur. On comprend bien pourquoi le savant est, justement, celui qui accède avec joie à « la rencontre d'un temps d'école, une discipline d'écolier »⁵⁵. Simultanément égaux et inégaux, tous les deux en quête de la vérité, tous les deux disponibles pour échanger leurs places, leurs doutes, leurs convictions, leurs résultats, les collègues sont, tour à tour, les enseignants et les élèves les uns des autres. Comme l'écrit Bachelard, dans la cité scientifique, « les savants vont à l'école les uns des autres »⁵⁶. Il y a alors, dans cette communication horizontale entre pairs, une vitesse qui ne se confond pas avec le rythme générationnel de l'institution scolaire. Une vitesse telle que la pensée scientifique exige fréquemment, pas seulement l'échange, mais l'inversion même de la dialectique du maître et du disciple : « Dans un laboratoire, un jeune chercheur peut prendre une connaissance si poussée d'une technique

⁵⁰ Bachelard soutient explicitement sa proximité avec « l'idonéisme » de Ferdinand Gonseth. Comme il le dit, il y a une « coexistence transcendante » des idées scientifiques (*Ibidem*, p. 37).

⁵¹ Bachelard, G., *Ibidem*, p. 13.

⁵² Bachelard, G., *Ibidem*, p. 11.

⁵³ Gil, D., *Bachelard et la culture scientifique*, Paris, PUF, 1993, p. 58.

⁵⁴ Bachelard, G., *Le Rationalisme appliqué*, op. cit., p. 23.

⁵⁵ *Ibidem*, p. 214.

⁵⁶ *Ibidem*, p. 23.

ou d'une thèse qu'il est sur ce point le maître de son maître »⁵⁷. Et même quand il est seul, l'homme de science habite toujours un monde très peuplé de tous ses collègues d'hier, d'aujourd'hui et de demain. On comprend bien que, pour un scientifique, « l'école continue tout au long d'une vie... Il n'y a de science que par une école permanente »⁵⁸.

4. École et communauté scientifique ont donc une fonction transcendante

Elles offrent à la science les conditions de possibilité matérielles nécessaires à sa production et à son développement. En d'autres termes, l'école et la cité savante, en conjugaison avec d'autres institutions culturelles universelles⁵⁹, composent une espèce de plan « transcendantal empirique » de la science, son « *a priori* historique », comme dirait Michel Foucault⁶⁰. Chaque pas dans la production de la connaissance scientifique est préparé par ces configurations et s'inscrit dans ces déterminations. C'est-à-dire, au-delà des qualités psychologiques, au-delà des méthodes et des instruments, il n'y aurait pas de science sans que ces configurations – comme l'ombre transcendante quoique matérielle de la science – ne fassent leur travail de manière persévérante, solide et articulée.

Or, l'école joue le rôle crucial de cette fonction transcendante. Seul l'enseignement scolaire, en tant que processus de communication verticale entre générations, garantit la cumulativité qui caractérise fondamentalement la connaissance scientifique. En tant que mécanisme qui prépare les prochaines générations d'investigateurs, l'école a mission de combattre les apparences trompeuses, de mettre en cause les convictions rapides, de forcer l'élève à substituer à la subjectivité de ses impressions premières l'objectivité des concepts et des lois, à opérer la conversion des intérêts, à admirer les beautés éloignées et abstraites de la science. Comme le dit Bachelard, « Les professeurs remplacent les découvertes par des leçons »⁶¹. Et il faut absolument qu'ils le fassent car il serait impossible autrement que la science puisse se constituer et se développer. Sans cette procédure économique que seule l'école accomplit, il n'y aurait non plus de science ni de progrès de la connaissance scientifique. L'école est le seul endroit où les prochaines générations ont l'opportunité d'apprendre rapidement, économiquement, ce qui a été découvert par les générations passées et, en même temps, d'acquérir les connaissances,

⁵⁷ *Ibidem*, p. 23.

⁵⁸ Bachelard, G., *La Formation de l'esprit scientifique*, op. cit., p. 252.

⁵⁹ C'est le cas de la bibliothèque, du musée et de l'encyclopédie. Cf. Pombo, O., "Unity of Science and Encyclopaedia: from the Idea to the Configurations", in Dana Riesenfeld; Giovanni Scarafie (eds), *Perspectives on Theory of Controversies and The Ethics of Communication. Explorations of Marcelo Dascal's Contributions to Philosophy*, Dordrecht/Heidelberg/London/New York, Springer, Series "Logic, Argumentation & Reasoning", 2014, p. 157-172.

⁶⁰ Foucault, M., *Les mots et les choses. Une archéologie des sciences humaines*, Paris, Gallimard, 1966.

⁶¹ Bachelard, G., *La Formation de l'esprit scientifique*, op. cit., p. 247.

les méthodes, les *habitus* nécessaires au progrès scientifique futur. C'est-à-dire, en plus d'un lieu de mémoire, en plus d'un lieu de transmission du savoir déjà constitué, l'école est le lieu où la science prépare son avenir. Comme le reconnaît aussi son contemporain Popper :

« Il y a un point simple et décisif dont néanmoins les rationalistes ne s'aperçoivent pas suffisamment – le fait que nous ne pouvons pas commencer du début, le fait que nous avons à utiliser ce qui a été fait par les personnes qui nous ont précédées dans la science. Si nous commençons du début, alors, quand nous mourions, nous serions plus ou moins au même point où étaient Adam et Eva quand ils sont morts (ou, si on préfère, l'homme de Néanderthal). Dans la science, si nous voulons faire des progrès, nous devons monter sur les épaules de nos prédécesseurs ».⁶²

5. Finalement, parce que l'école est la seule institution capable de vaincre l'irréversibilité du temps humain

Juste deux notes :

1. On sait que le programme ultra-rationaliste et phénoménotechnique de Bachelard veut surtout garantir que le nouveau soit possible. Un programme qui demande donc une philosophie du temps compatible avec cette apologétique du nouveau.

Or, la métaphysique du temps de Bergson attrape le passé et le futur dans le présent, tous impliqués dans l'élan d'un temps continu, d'un flux ininterrompu. L'homme, alors, y « marche avec la sécurité du somnambule », dit Bachelard⁶³. Le nouveau n'est pas prévu dans ce flux continu du temps. La vie coule. On suit le flux. Le flux a son devenir propre, autonome. Il continue toujours « même si on ne fait rien »⁶⁴. Le possible reste toujours possible. Notre volonté et nos capacités d'invention sont anéanties.

Au contraire, dans une métaphysique du temps discontinu, le nouveau est une possibilité persévérante, constamment ouverte. Comme le dit Bachelard, « la nouveauté est évidemment toujours instantanée »⁶⁵. Chaque instant est fécond. Il porte avec soi la promesse d'un commencement absolu. Si le temps est constitué d'atomes isolés, autonomes, intensifs, chaque atome est « événement pur »⁶⁶, ouvert à notre choix. C'est à nous de l'affronter, de choisir son destin. On peut alors l'ignorer, le laisser faire. Ou on peut prendre cet événement avec verticalité, comme une opportunité créative, comme une intensité, comme un commencement inaugural et fertile du nouveau. Et, si la durée est une poussière d'atomes de temps, ces atomes peuvent être, ou bien hétérogènes, se

⁶² Popper, K., *Conjectures and refutations. The growth of scientific knowledge*, Londres, Routledge, 1963, p. 129 (je traduis).

⁶³ Bachelard, G., *La Dialectique de la durée*, op. cit., p. 1.

⁶⁴ *Ibidem*.

⁶⁵ Bachelard, G., *L'Intuition de l'instant*, op. cit., p. 37.

⁶⁶ Bachelard, G., *La Dialectique de la durée*, op. cit., p. 43.

dispersant de façon incohérente, sans être investis d'aucune exceptionnalité inventive (le temps vécu, le flux des phénomènes), ou bien créatifs, intenses, profonds, se distribuant alors de façon « cohérente, organisée, consolidée en durée »⁶⁷. Comme une mélodie.

Cela veut dire qu'avec une métaphysique du temps discontinu, Bachelard réussit à encadrer la nouveauté et, au même temps, peut soutenir que la science est, elle-même, riche de « cohérence temporelle ». Par son développement interne, par la ré-organisation triomphante des instants innovateurs qui la constituent, elle est, par elle-même, productrice de temporalité⁶⁸. La science est un présent qui revient perpétuellement vers le passé et qui ouvre courageusement au futur. Et elle fait ça avec une force créative continuelle et passionnée. Comme le dit Bachelard :

La pensée scientifique est le principe qui donne le plus de continuité à une vie ; elle est, entre toutes, riche d'une puissance de *cohérence* temporelle ou, pour employer un concept cher à Korzybski, la pensée scientifique est éminemment 'time binding'. Par elle, les instants isolés et décousus se lient fortement.⁶⁹

2. Si les hommes étaient immortels, il pourrait y avoir la construction d'une culture sans que l'école soit nécessaire. Il y aurait une circulation horizontale des connaissances librement acquises par les individus dans l'éternité de leur vie, dans l'amitié de leurs relations communicatives. Ainsi, les hommes pourraient instituer des traditions et même constituer une culture sans avoir besoin d'école. C'est ce qui arrive avec les dieux. Ils ne vont pas à l'école. Non seulement parce qu'ils savent déjà tout, mais aussi parce que, même s'ils ne le savaient pas, ils auraient à leur disposition tout le temps d'apprendre.

Mais les hommes ne sont pas immortels et la précarité de leur vie impose l'exigence de l'école. Pour surmonter l'irréversibilité du temps humain, les hommes ont dû créer de nouveaux mécanismes de transmission des connaissances des générations précédentes aux générations futures. Sans eux, nous serions comme des abeilles, répétant éternellement les mêmes gestes et les mêmes mots. Depuis l'Académie de Platon, l'école est cette institution, ce lieu de constitution de l'homme comme celui qui hérite du passé, qui s'enracine, au commencement, à la source, et qui, par conséquent, précisément pour cela, est en mesure de continuer, de construire l'avenir.

C'est pourquoi l'école est cyclique, qu'au début de chaque année scolaire, tout re-commence, tout re-vient toujours. On re-çoit les étudiants justes arrivés. Les programmes re-commencent. On enseigne (à nouveau) les (anciennes) opérations élémentaires. On prépare ceux qui, justement à cause de ce re-commencement, sont en mesure de maintenir, de poursuivre, de construire le futur. Seule l'École

⁶⁷ *Ibidem*, p. 78.

⁶⁸ « Le temps des processus de pensée scientifique est donc un temps réorganisé, revécu, repensé, vidé de toutes les occasions et de toutes les contingences » (Bachelard, G., *Le rationalisme appliqué*, op. cit., p. 37).

⁶⁹ Bachelard, G., *La Philosophie du non*, op. cit., p. 127.

inscrit, dans le cheminement toujours en avant de la condition humaine, le retour à l'héritage culturel du passé et, ainsi, elle perpétue et prolonge le lien de la création.

Le temps cyclique et saisonnier de l'École s'inscrit dans le temps linéaire de la vie des élèves. Je cite encore Bachelard :

Septembre fait mûrir les fruits de mon jardin. Bientôt, ce sera octobre, ce grand mois ! Le mois où toutes les écoles sont jeunes, le mois où tout recommence pour la pensée studieuse⁷⁰.

Olga Pombo

CFCUL – Centro de Filosofia das Ciências da Universidade de Lisboa
opombo@fc.ul.pt

Bibliographie

- Bachelard, G., *L'Intuition de l'instant*, Paris, Gonthier, [1932] 1971.
 Bachelard, G., *La Formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, [1938] 1993.
 Bachelard, G., *La Philosophie du non*, Paris, PUF, [1940], 1975.
 Bachelard, G., *Le Rationalisme appliqué*, Paris, PUF, 1949.
 Bachelard, G., *La Dialectique de la durée*, Paris, PUF, [1950], 1980.
 Bachelard, G., *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1951.
 Bachelard, G., *La Poétique de la rêverie*, Paris, PUF, [1960] 1986.
 Bachelard, G., *La Flamme d'une chandelle*, Paris, PUF, 1961.
 Bachelard, G., *L'Engagement rationaliste*. Paris, PUF, 1972.
 Bontems, V., *Bachelard*, Paris, Les Belles Lettres, 2010.
 Bontems, V., (dir.), *Bachelard et l'avenir de la culture. Du surrationalisme à la raison créative*, Paris, Presses des Mines, 2018.
 Bourel, D., « De Bar-sur-Aube à Jérusalem, La correspondance entre Gaston Bachelard et Martin Bubber », *Revue internationale de philosophie*, n° 150, 1984, p. 201-216.
 Canguilhem, G., « Sur une épistémologie concordataire », in Bouligand, G., Canguilhem, G., Costabel, P., Courtes, F., Dagognet, F., Daumas, M., Granger, G. G., Hyppolite, J., Martin, R., Poirier, R., Taton, R., *Hommage à Gaston Bachelard. Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, 1957, p. 3-12.
 Dagognet, F., « Le problème de l'unité », *Revue internationale de philosophie*, n° 150, 1984, p. 245-256.
 Foucault, M., *Les mots et les choses. Une archéologie des sciences humaines*, Paris, Gallimard, 1966.
 Granger, G.G., « Janus bifrons », *Revue internationale de philosophie*, n° 150, 1984, 257-271.
 Gil, D., *Bachelard et la culture scientifique*, Paris, PUF, 1993.
 Havelok, E., *The Muse learns to write*, New Haven, Yale University Presse, 1986.
 Kotowicz, Z., *Bachelard 50 ans après*, Lisbonne, CFCUL, 2016.
 Lamy, J., « Le maître et l'élève dans l'enseignement rationaliste : une (re)lecture bachelardienne de la dialectique du maître et de l'esclave de Hegel, <https://hal.science/hal-01831320v1/document> »
 Lecourt, D., « De Bachelard au matérialisme historique », *L'arc*, n° 42, 1970, p. 5-13.
 Lecourt, D., *Bachelard. Le jour et la nuit*, Paris, Grasset, 1974.
 Lescure, J., « Introduction à la poétique de Bachelard », in Bachelard, G., *L'intuition de l'instant*, Paris, Gonthier, [1932] 1971, p. 113-149.
 Neurath, O., *Foundations of the social sciences*, Chicago, University of Chicago Press, 1944, p. 47

⁷⁰ Bachelard, G., *Le Rationalisme appliqué*, op. cit., p. 214.

- Osborn, R., Bell, B., Gibert, J., « Science teaching and children's views of the world », *Journal of research in science teaching*, Vol. V, n° 1, 1983, p. 1-14.
- Pombo, « Bachelard et la cité savante », in Bontems, V., (dir.), *Bachelard et l'avenir de la culture. Du surrationalisme à la raison créative*, Paris, Presses des Mines, 2018, p. 109-120.
- Popper, K., *Conjectures and refutations. The growth of scientific knowledge*, Londres, Routledge, 1963.
- Starobinski, J., « La double légitimité », *Revue internationale de philosophie*, n° 150, 1984, p. 231-244.

Marie-Pierre Lassus

Musique quantique et temps ondulant.

Pour une théorie ondulatoire de l'alouette

Les mondes de l'art et de la science se sont rencontrés au tournant du XX^e siècle autour du concept d'énergie lié à un univers en expansion, un espace-temps semblable au *son qui est un monde*. Avec sa profondeur et sa hauteur, cet espace « tient du temps comprimé »¹, objet des recherches des compositeurs, en quête de ce monde micro-acoustique, sans cesse en mutations comme la vie de la matière, identifiée à de l'énergie par les physiciens. Menées parallèlement, ces découvertes ont imposé la nécessité d'une logique nouvelle pour pouvoir approcher la nouvelle réalité, changeante, incertaine et acausale, commune à la science et à la musique, où les formes sont des forces conditionnées par le mouvement².

Entre présence et absence, la musique peut-elle être envisagée à la fois comme un phénomène quantique³ au sens d'une énergie produite à partir d'éléments discontinus, (les quanta en physique) et un cas particulier de phénoménotechnique au XX^e siècle avec la naissance de la musique électroacoustique ? « Seul domaine où l'homme réalise le présent » (celui-ci étant voué, le plus souvent, à subir le passé et à se projeter dans l'avenir) la musique est avant tout un phénomène qui permet « d'instituer un ordre dans le temps » affirme Stravinsky (1882-1971)⁴ rejoignant ici Bachelard (« le temps est un ordre et n'est rien autre chose »⁵). Cela exige une construction. « La construction faite, l'ordre atteint, tout est dit » selon le compositeur pour qui cet art du temps est intimement lié à l'espace, devenu une composante active du son avec lequel il interagit⁶ dans la nouvelle musique.

¹ 1 Bachelard, G., *La poétique de l'espace*, Paris, PUF, 1957, p. 27.

² Cf. la conception de la matière chez Bachelard, G., : « Il ne peut y avoir de forme fixe. Le mouvement conditionne la forme », *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine*. Paris, 1937, Alcan, p. 74.

³ Bachelard, G., *L'intuition de l'instant*, Paris, Stock, 1931, p. 47: « Si nous pouvions entendre tous les instants de la réalité, nous comprendrions que ce n'est pas la croche qui est faite avec des morceaux de blanche mais la blanche qui répète la croche ».

⁴ Stravinsky, I., *Chroniques de ma vie*. Paris, Denoël-Gonthier, 1962 [1935], pp. 63-64.

⁵ Bachelard, G., 1931, op. cit., p. 105.

⁶ Cf. la nouvelle musique initiée par Debussy : « La musique et la poésie sont les deux seuls arts qui se meuvent dans l'espace ... Je puis me tromper mais il me semble qu'il y a dans cette idée, du rêve pour les générations futures ». Debussy, C., « La musique en plein air. *Revue Blanche*, 1^{er} juin 1901 », in Debussy, C., *M. Croche et autres écrits*, Paris, Gallimard, 1987, pp. 45[46].

Phénoménologie de la musique

Marie-Pierre Lassus

Dotée d'une énergie complexe, la musique n'est pas un « objet » appartenant à un monde d'entités stables que l'on pourrait mesurer et fixer définitivement sur un support (la partition ou le disque par ex) : elle est un « souffle autour de rien [...] un vol, un vent »⁷. Vouée à disparaître à peine surgie du silence d'où elle provient, cet événement singulier, vécu dans l'instant, n'est pas reproductible ; raison pour laquelle le chef d'orchestre Sergiu Celibidache (1912-1996)⁸ s'opposait aux enregistrements qui nuisaient selon lui à l'originalité radicale de ce phénomène vivant et énergétique, surgissant de manière spontanée, condition pour qu'il y ait « art ».

Cette phénoménologie de la musique s'oppose à l'approche analytique courante, quantitative et objectiviste, cherchant à la décomposer en fragments isolés pour mieux « l'expliquer ». Or, une telle démarche ne nous dira rien de l'intensité de la musique, flamme mouvante qui se vit avant tout de manière qualitative, subjective et intersubjective, dans l'instant de son apparition.

Au sens *phénoménologique*, la musique correspond à ce « réalisme sans substances » nécessaire pour penser l'existence d'une autre réalité, contradictoire, rebelle à la logique de l'identité comme au langage verbal qui la chosifie alors qu'elle n'est que *mouvement*.

Il existe cependant une différence entre cette phénoménologie de l'instant présent vécu subjectivement chez Husserl et la phénoménoteknique de Bachelard où le phénomène n'est pas donné mais *produit* par les instruments du physicien qui va ainsi le construire de toute pièce ; un peu comme le musicien, attentif à la structure micro-acoustique du son qu'il mesure à l'aide d'appareils électriques.

Pour donner une idée des « êtres-mouvements » de ce « réel voilé »⁹, non saisissable (la seule présence du physicien modifiant les résultats de l'expérience), Bachelard a recours à une métaphore : celle de l'oiseau (l'alouette) emblématique de la musique, à la fois forme et force, qui va donner corps à l'idée d'énergie, non pas au sens scientifique du terme, mais en tant que « merveilleux concept, placé comme un intermédiaire entre le potentiel et l'actuel, l'abstrait et le concret, l'espace et le temps »¹⁰. C'est dans ce temps *intermédiaire, entremetteur, dans l'espace-temps du projet*¹¹ que se situe aussi l'art selon lui. Par une synthèse entre le poétique, le scientifique et le psychologique dont il a le secret, Bachelard identifie tour à tour l'alouette à un « mouvement qui chante », à un « corpuscule et une onde de joie » évoluant dans l'espace-temps d'un « nouveau monde » sans substances ni « objet »¹².

⁷ Rilke, M-R, Sonnets à Orphée, III, Œuvres poétiques et théâtrales, La Pléiade, Paris, Gallimard, 1997, p 587. Le poète Rainer-Maria Rilke est un auteur très présent chez Bachelard et souvent cité dans ses livres sur les éléments et dans ses deux poétiques.

⁸ Celibidache, S., « Phénoménologie de la musique » *Présentaine* n° 22, octobre 2007, p. 15-100.

⁹ D'Espagnat, B., *Le réel voilé. Analyse des concepts quantiques*. Paris, Fayard, 1994.

¹⁰ Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*. Paris, PUF, 1983 [1934], p. 84.

¹¹ Bachelard, G., *Le droit de rêver*, Paris, PUF, Quadrige, 1970, p. 102.

¹² Bachelard, G., *L'air et les songes*, Paris, José Corti, 1943, p. 80.

La métaphore de l'oiseau-musique est également utilisée par le compositeur K. Stockhausen (1928-2007) dans sa description de la musique électronique dont il est l'inventeur (en 1956) et dont le but ultime est de faire voyager l'auditeur, lui permettre de s'envoler dans l'espace par une adhésion totale aux mouvements de ces oiseaux-sons qui doivent le transformer, physiquement et mentalement (le faisant devenir plus grand, plus large (ou l'inverse) comme *Alice au pays des Merveilles*¹³) s'il sait écouter. Alors, il éprouvera en lui cette expansion de l'espace qui procure une joie extrême à l'oiseau, devenu joie pure ou « joie sans corps »¹⁴, inséparable de l'espace immense dans lequel il évolue librement. Agencés selon une nouvelle sémantique spatiale qui fait voler l'auditeur en diagonale ou en spirale, verticalement ou en rotation, les sons de la nouvelle musique se transforment ainsi en rythme, en timbre ou en bruit au moyen d'appareils électriques qui modifient leur vitesse et mesurent leurs fréquences avec précision.

Musique et Phénoménotechnique

Conséquence directe de cette nouvelle manière de composer, l'imagination du compositeur est ici indissociable de la technique et des appareils électroacoustiques. Car s'il veut découvrir l'intériorité du son, saisir sa réalité complexe, le musicien doit devenir acousticien et travailler sur les « spectres sonores » (c'est-à-dire l'oscillation avec ses vibrations partielles ou « partiels »). Pensé comme un résultat et non plus comme un matériau donné d'avance (cf. l'ancienne musique) le son est désormais paramétré avec précision, *composé*, de façon qu'il contienne en lui-même la forme ou « la maison de temps » à venir (selon l'expression de Stockhausen). Tout le travail consistera à le transformer par des moyens électriques en intégrant les bruits qui participent à sa vitalité.

Ainsi, composer revient à « mettre ensemble » ces différents spectres au service de la création d'une œuvre qui émanera d'un son unique, recueilli par un générateur électrique avant d'être traité sur bande magnétique, enregistré en vue d'un montage.

Contrairement à la phénoménologie de la musique prônée par S. Celibidache, pour qui elle n'existe que jouée par des êtres vivants dans l'instant de son apparition, chez Stockhausen, la musique (électroacoustique) est entièrement conditionnée par les inventions phénoménotechniques (ou machines) qui permettent de déterminer à la fois la structure du son, sa couleur, son intensité et la précision de sa venue dans le temps, grâce à des mesures électroniques (mesure de la bande magnétique, mesure en décibels de l'intensité, mesure des hauteurs par le nombre des fréquences etc.) qui sont toutes des mesures tech-

¹³ Stockhausen, conférence du 28/08/1974, « Rencontres Internationales d'art contemporain ». <https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/les-nuits-de-france-culture/conference-de-karlheinz-stockhausen-aux-rencontres-internationales-d-art-contemporain-9815071>

¹⁴ Bachelard, G., 1943, op. cit., p. 103.

niques. Cela dit, que l'on utilise un instrument de musique ou une machine, un magnétophone et un générateur, il s'agit toujours de déterminer les sons dans leurs timbres, leurs rythmes, leur temporalité. Le musicien crée toujours selon une nécessité intérieure qui l'amène à choisir et à fabriquer des matériaux en vue de réaliser la musique qu'il a en lui. Si la voix humaine ou un instrument s'impose à lui, rien ne l'empêche de les utiliser aux côtés du générateur électrique. C'est ce que fit Stockhausen dans *Gesänge der Jünglinge* (1956) pour 5 groupes de haut-parleurs placés autour du public, cherchant à réaliser une continuité entre les sons chantés et les sons produits électriquement. Pour cela, il a fallu d'abord composer chaque son, lui attribuer un timbre ou une couleur spécifique par l'utilisation de tous les paramètres (attaques, intensités, hauteurs, etc...) avant de pouvoir inventer une relation nouvelle entre sons naturels et sons artificiels, au moyen de générateurs électriques. Cet exemple montre que ce n'est pas la machine qui décide mais l'humain et celle-ci est là uniquement pour apporter la précision voulue et définir la structure sonore à l'intérieur des sons eux-mêmes.

Malgré leur divergence, ces musiciens s'accordent sur le fait que *le son lui-même est un monde qui vit* et se transforme sous l'effet du rythme de ses vibrations¹⁵ et intensités pour créer un temps discontinu, doté d'une épaisseur constitutive de sa verticalité. Une pluralité de plans sonores est à l'origine de ce *nouveau monde* où l'accord a fait place au « bloc », la voix aux « strates » (appelées « formants » chez Stockhausen) tandis que les points et contrepoints sont devenus des « constellations ». En jouant sur les formants, on modifie le timbre et le rythme d'un son que l'on peut désormais entendre dans toute sa profondeur et sa hauteur. Ce temps vertical et relatif à l'espace, qui jaillit en se renouvelant sans cesse selon les rythmes sonores et les intensités de ses « phases temporelles » a bien été perçu par Bachelard pour qui « la matière existe sur le plan du rythme » inséparable des timbres et des intensités qui la constituent (« le vrai rythme poétique est fait du groupement des tonalités. Il est ...*intensité* »¹⁶).

Que l'on ne puisse séparer le rythme du timbre et du temps c'est ce qu'a démontré K. Stockhausen dans son fameux texte *How time passes* où il va théoriser cette nouvelle conception d'un *temps contenu dans le son* (et non l'inverse), capable de se transformer (et de nous transformer) selon les vitesses et directions que le compositeur lui donne (au moyen des appareils électriques) dans une composition en couches multiples (=les formants) intégrant aussi les bruits.

¹⁵ Un son est produit par les vibrations de l'air qui se propage par augmentation de la densité des molécules (cf. la pression acoustique) et alterne avec des moments de raréfaction, pour créer un mouvement ondulatoire, perçu dans un temps ondulant qui jaillit et se renouvelle en fonction de tous les paramètres : hauteurs, fréquences, durées, intensités, attaques... agissant ensemble pour donner au son sa couleur ou son « timbre », à partir de sa structure temporelle, (cf. le rythme interne de ses fréquences ou battements).

¹⁶ Bachelard, G., *La dialectique de la durée*. Paris, PUF, 1989 [1936], pp.130 et 126.

Une musique qui serait la vie même...

Art invisible et non substantiel, la musique entretient une relation particulière avec le temps : éphémère, elle actualise le présent. Par son caractère dynamique, elle est emblématique de la vie, demeurée insaisissable par la science qui, en cherchant à la définir, perd ce présent qui la fonde et dont la musique est l'expression immédiate selon Nietzsche¹⁷. « On ne décrit pas ce qui surgit » confirme Bachelard pour qui c'est au poète (et au musicien) de nous le faire entendre. Car la vie, on peut la vivre mais pas la saisir intellectuellement. « En écoutant le Temps, le poète entend les miracles du Temps »¹⁸ contrairement au philosophe, qui, lui, « n'a pas d'oreille pour la vie ». Nier la musique de la vie (pour autant que la vie est musique) est une condition pour philosopher¹⁹, ironisait le Nietzsche. Bachelard partage avec ce philosophe-musicien une oreille fine, réceptive au moindre mouvement d'une matière sonore travaillée par les mouvements contraires.

Pour éprouver les valeurs vitales de la musique comme de la physique quantique, un domaine en rupture avec l'ontologie substantialiste, il faut trouver un vocabulaire propre, évocateur de ce dynamisme.

Art non-verbal, la musique échappe à l'analyse classique comme certains phénomènes de physique quantique qui ont conduit Bachelard à proposer le postulat de « non-analyse »²⁰ et à entrevoir l'idée d'une autre logique (celle du « tiers-état »²¹ par ex.) en lieu et place de la logique du dualisme et de l'identité sur laquelle repose toute la philosophie occidentale depuis Aristote. Comment saisir cette vie « qui à la fois monte et descend, s'élance et hésite, se transforme et s'endurcit »²² ? Les poètes savent donner corps à cette énergie dans leurs poèmes qui *ne traduisent pas des idées* (« on n'imagine pas des idées »²³) mais induisent en nous des mouvements en puisant dans les mots la matière musicale, indissociable de la forme. Car les mots sont des sons avant d'être des images comme le sait tout poète qui

¹⁷ « La Musique est l'idée immédiate de cette vie [...]. L'art plastique a un but tout différent ». Nietzsche, F., *La Naissance de la Tragédie*, Paris : Librairie générale française, 1994, p. 129. Souvent cité dans *L'air et les songes*, ce philosophe musicien est en bonne place dans le livre de Jean Libis: Libis, J., *Les lectures de Gaston Bachelard*, Presses Universitaires de Franche-Comté, Besançon, 2011, p.193. L'assimilation de la musique à la vie, incarnée par l'oiseau (l'alouette et le phénix) est un autre point commun à ces deux philosophes dont la sensibilité musicale apparaît dans leurs écrits (rappelons que Nietzsche était aussi compositeur et que ses œuvres pour piano ont été enregistrées par le compositeur et interprète Alain Kremski).

¹⁸ Bachelard, G., *Fragments d'une poétique du feu*, Paris, PUF, 1988, pp. 88 et 92.

¹⁹ Nietzsche, F., *Le Gai savoir. Œuvres philosophiques complètes* V.§372, Paris, Gallimard, 1967, p. 280.

²⁰ Bachelard, G., *La philosophie du non. Essai d'une philosophie du nouvel esprit scientifique*. Paris, PUF, 1975, 1940, p. 123.

²¹ Notion développée par Paulette Destouches-Février dans sa thèse, dirigée par Bachelard, et qui se réfère à cet état intermédiaire entre présence et absence, sur laquelle repose la musique, entre sons et silences.

²² Bachelard, G., 1943, op. cit., p.297.

²³ Bachelard, G., 1988, op. cit., p. 39.

*ne confond pas le langage de la signification et le langage poétique*²⁴, conscient que « traduire une de ces langues dans l'autre ne saurait être qu'un pauvre métier ». De même, les physiciens se sont trouvés devant un obstacle de taille quand il s'est agi de traduire dans le langage conventionnel, fondé sur une logique substantialiste, la réalité mystérieuse de la mécanique quantique. Car comment exprimer cette réalité à la fois dynamique, potentielle et indéterminée avec un vocabulaire adéquat et une syntaxe appropriée ? « Nous ne pouvons éviter d'employer un langage charriant toute une philosophie traditionnelle alors que « les mots ont perdu en grande partie leur signification » constate W. Heisenberg²⁵ (1901-1976), le créateur du Principe d'incertitude ou d'indétermination (1927).

Créer des (nouveaux) mots à partir des sons, tel était le rêve de Stockhausen dans *Gesange der Jünglinge* où il a conçu, entre les spectres harmoniques des sons vocaliques (voyelles) et consonantiques (bruits) un continuum qui fait apparaître les sons chantés comme des instants particuliers dans le but de créer une langue nouvelle avec des sons. Finalement, la musique ne pourrait-elle pas fournir cet autre langage emblématique d'une « esthétique de l'énergie » prônée par Bachelard dès 1939²⁶ tout en mettant de l'ordre dans le temps²⁷ ?

La musique : un ordre dans le temps

Placé sous le régime de la contradiction, la musique est selon Bachelard (via Nietzsche) un Oiseau Phénix²⁸ qui tour à tour meurt et renaît au rythme de vie et de mort. Elle est un élan, une naissance qui marque un instant du monde en détruisant la continuité du temps chronologique, au profit d'un temps *vertical qui ne suit pas la mesure*²⁹ et réunit une pluralité d'événements contradictoires. Nous verrons bientôt quelle est la nature de cette « mesure du temps » que les compositeurs du XXe ont explorée dans leurs recherches sur le phénomène physique du son. Mais cet instant immobilisé par ses contradictions internes, finalement est-ce du temps ?

Bachelard répond par l'affirmative car ces simultanités sont *ordonnées*. Et il en déduit que le temps n'est rien d'autre que *cet ordre institué par une pluralité d'événements simultanés* comme c'est aussi le cas dans la nouvelle musique du XXe, pensée comme une « synthèse temporelle »³⁰ qui les fait vivre dans l'instant présent. Ainsi, la

²⁴ Bachelard, G., *La poétique de la rêverie*, Paris, PUF, 1961, p. 160.

²⁵ Heisenberg, W., «The nature of elementary particles», in E., Castellani (ed.), *Interpreting Bodies: classical and Quantum Objects in Modern Physics*, Princeton, Princeton University Press, 1998, p. 218.

²⁶ Bachelard, G., *Lautréamont*, Paris, José Corti, 1939, p.100.

²⁷ C'est ce que pense le compositeur Salvatore Sciarrino (1947 –) : « je suis convaincu que d'infinis rapports lient le langage musical à la réalité, affirme-t-il, et que la musique peut se substituer à elle et l'intégrer de quelque manière », Sciarrino, S., *Le Figure della Musica*, Ricordi, Milan, 1998, p. 57.

²⁸ Bachelard, G., *Fragments d'une poétique du feu*, op. cit., p. 88.

²⁹ Bachelard, G., 1931, op. cit., p. 104.

³⁰ Bachelard, G., 1989 [1936], op. cit., p. 117.

musique doit transcender le temps en l'organisant musicalement pour rendre réel ce présent si difficile à saisir, grâce à la mise en œuvre d'un temps ondulant et vertical. « Le but, c'est la verticalité et la profondeur » assure Bachelard³¹ en écho à Debussy (pour qui la profondeur est ce qui déclenche l'imagination) et à Stravinsky, cité dans *L'air et les songes* où *Le Sacre du Printemps* est pris comme exemple³² : de même que le temps *procède par bonds, en sautant par-dessus les durées inutiles*³³, privilégiant ainsi l'intensité de chaque instant, le plan d'immanence qui seul existe (appelé *L'Ouvert* par R-M Rilke) « l'être humain veut surgir du sol. Le saut est une joie première »³⁴. Cela fait de l'homme « une somme intégrale de rythmes »³⁵ dira Bachelard comme en écho à Xenakis pour qui *l'homme est un être discontinu* : « la continuité est une chose qui lui échappe constamment [...] c'est une sorte de lutte perpétuelle de notre perception et de notre jugement que d'essayer d'imaginer le mouvement continu »³⁶. C'est pourquoi les musiciens du XXe ont eu recours à la musique électronique pour pallier, entre autres, ce manque.

La musique éveille le temps...

Réalisée dès 1953 au studio de Cologne, la musique électronique est l'aboutissement de la réflexion de Stockhausen sur le son et le temps (cf. les *Studies* 1 et 2). Relevant la contradiction entre l'utilisation de sons instrumentaux, donnés, et les concepts de la nouvelle musique où tout est à construire, y compris et surtout, le son, Stockhausen refuse « la dictature du matériau » (à l'œuvre dans l'ancienne musique). Par l'écoute de ses rythmes internes, rendue techniquement possible par les appareils électriques, il cherche un accord entre cette « micro-acoustique » du son et la macrostructure musicale tout en réalisant une synthèse grâce aux bandes magnétiques qui permettent d'enregistrer le son avant le travail de montage des pièces de ruban en studio. L'étude de la structure physique des sons a amené Stockhausen à utiliser la machine pour mesurer le temps (résultat de l'agencement de tous les paramètres) avec de plus en plus de précision : désormais, c'est en nombre de fréquences, de vibrations par seconde que l'on mesure les hauteurs (de même que l'on mesure la bande, le ruban en centimètres). Dans sa démarche scientifique, Stockhausen entreprend d'effectuer une recherche théorique en s'appuyant sur les phénomènes acoustiques pour résoudre la question du timbre restée irrésolue³⁷.

³¹ Bachelard, G., « Instant poétique et instant métaphysique » *Revue Messages : Métaphysique et poésie*, 2, 1939. *L'intuition de l'instant*. (1992), p. 104.

³² Bachelard, G., 1943, op. cit., p. 27.

³³ Bachelard, G., 1989 [1936], op. cit., p. 35.

³⁴ Bachelard, G., 1943, op. cit., p. 77.

³⁵ Bachelard, G., 1931, op. cit., p. 71.

³⁶ Xenakis, I., *Arts/Sciences/alliages*. Paris, Casterman, 1979, p. 104.

³⁷ Après Webern (1853-[1945]), qui a donné toute l'importance au timbre en le faisant surgir d'un silence qualitatif, O. Messiaen, fut l'un des premiers à rompre avec la hiérarchie des paramètres : l'habitude de considérer les hauteurs et les durées comme éléments privilégiés a été renversée dans sa 4^e étude pour piano *Modes de valeurs et d'intensités* ([1949]) où tous

Un son instrumental se définit par un spectre c'est-à-dire une oscillation fondamentale et ses vibrations (= partiels). Celles-ci ont une distribution, des intensités respectives, un ordre successif d'entrée dans le temps et une cessation bien spécifique qui détermine la couleur du son ou « timbre ». Ce que recherche le compositeur, c'est de pouvoir relier toutes les composantes du son et passer d'un son pur à un son coloré puis à un bruit dans un continuum sonore qui crée des formes en perpétuelle transformation. L'écoute, assignée à un pur présent sans cesse changeant, donne lieu au concept de « forme-moment », qui est le résultat d'une stratification des sonorités effectuée par les rythmes internes qui les animent. Chacun de ces moments est une « coupe d'un temps vertical » multidirectionnel, d'une grande cohérence, révélant une organisation sonore où la diversité fusionne dans l'unité ; de sorte que la composition se présente comme « un agrandissement dans le champ temporel acoustique de la microstructure des oscillations harmoniques à l'intérieur du son lui-même »³⁸ devenu un cosmos en miniature selon le principe que « tout est lié à tout ».

Dans sa conception verticale du temps, Stockhausen cherche à *faire de la dimension temporelle la valeur suprême de l'organisation* [...] sous la forme de proportions qui gouvernent les différents paramètres et les différents niveaux de l'œuvre, *depuis les oscillations à la base du son jusqu'aux structures formelles globales* ».³⁹

C'est cette idée qu'il va développer dans son texte « comment passe le temps » écrit en 1956 et publié en 1957 dans la revue *Die Reihe*⁴⁰, en démontrant de manière scientifique le lien structurel entre tous les paramètres du son (hauteurs, durées, attaques, intensités...) avec la forme et sa dimension temporelle. Cela renforce l'idée, chère aux interprètes, selon laquelle « en musique, tout doit être constamment et en permanence relié [...] Faire de la musique requiert [...] la compréhension des manifestations physiques du son, une intelligence de l'interdépendance de tous les éléments musicaux »⁴¹.

... Comment passe le temps...

Entre deux impulsions acoustiques, Stockhausen constate, que le temps change la perception des hauteurs en perception de durées et qu'il existe un lien structurel

les paramètres sont sollicités pour composer le son et lui donner sa couleur spécifique. C'est ce qu'il cherchera à préciser ensuite avec son système harmonique et rythmique, élaboré à partir de chants d'oiseaux.

³⁸ Albera, Ph., Karlheinz Stockhausen. Comment passe le temps. Essais sur la musique 1952-1961, Genève Contrechamps, 2017, p. 27.

³⁹ *Ibid.*

⁴⁰ La revue fut publiée par Universal Edition (Vienne) entre 1955 et 1962 (ISSN 0486-3267). Une édition anglaise a été publiée, sous le titre original allemand, entre 1957 et 1968 par la Theodore Presser Company (Bryn Mawr) en association avec Universal Edition (Londres) (ISSN 0080-0775).

⁴¹ Barenboim, D., La musique éveille le temps, Paris, Arthème Fayard, 2008 pp. 21 et 23.

entre le rythme, le timbre, le temps et la forme : le rythme devenant timbre et le rythme-timbre devenant forme. Ce qui lui fait comprendre que l'œuvre entière, depuis la microstructure du son jusqu'à la macrostructure de l'ensemble n'est *qu'une forme du temps*. Dans le studio de Cologne, il travaille à partir des ondes sinusoïdales (= à vibration simple, sans résonance par sympathie ex. un son de flûte) et les superpose pour construire des timbres qui donneront naissance aux structures compositionnelles.

Un son musical de fréquence N peut toujours se décomposer en une somme de grandeurs périodiques dont les fréquences sont $2N$, $3N$, $4N$ etc. c'est-à-dire les multiples entiers de la fréquence de base N ordonnés en une progression arithmétique. Le son de départ se nomme « son fondamental » et les autres s'appellent « harmoniques ». L'ensemble forme la série des harmoniques d'un son donné. Celui-ci est autant une fondamentale de hauteur que de durée (Stockhausen parle de « phases temporelles ») car les durées sont constitutives du timbre et inversement, le timbre est constitutif des durées. Dit autrement, *le rythme c'est du timbre et le timbre est fonction du rythme*. Ainsi, le timbre change au gré des rythmes et des intensités⁴².

« C'est l'intensité qui donne la durée » celle-ci n'étant que la conséquence de celle-là confirme Bachelard pour qui « Nous avons d'abord les timbres ; ensuite les durées »⁴³. Cette pensée témoigne de la proximité de son écoute avec celle des musiciens contemporains et de sa compréhension du rôle du chef d'orchestre, ce « maître des allures » dont la fonction n'est pas de « battre la mesure » mais de coordonner les rythmes et les temps de chacun afin que s'ouvre, *entre* les êtres, cet espace-temps dont les champs de vibrations donnent toute leur saveur aux sons et aux silences.

Temps sphérique et poétique de l'indétermination

Stockhausen va s'orienter vers un temps sphérique où il n'y a plus d'avant ni d'après. Un seul son, englobant et complexe, forme une constellation dont il va modifier le spectre sonore en jouant sur les intensités, les vitesses comme dans *Gruppen*, (1958) qui est l'application de ses recherches théoriques sur le son et le timbre. Après *Zeitmasse* (1956) (« mesure de temps » en allemand) une œuvre de musique de chambre pour laquelle le compositeur a prévu 5 mesures différentes, (parmi lesquelles « le plus vite possible », ralentir jusqu'à un tempo 4 fois plus lent, le contraire, « le plus lentement possible » + un tempo métronomique), il décide de convoquer un grand orchestre de 109 musiciens divisé en 3 groupes, chacun ayant son propre chef et évoluant dans des tempi différents. Cette simultanéité de temps différents obtenue dans le présent d'un Temps vertical conçu par strates superposées, renforce encore l'indétermination dans la composition où il cherche à créer des liens entre les sons déterminés (cordes, vents) indéterminés (les percussions) et les bruits (*idem*).

⁴² C'est aussi vrai dans la musique tonale, où il n'y a finalement qu'un seul spectre, une seule phase de temps mais qui change à chaque modulation (comme le fait Beethoven par ex.)

⁴³ Bachelard, G., 1989 [1936], op. cit., p., 126.

Ainsi, il introduit la notion de « champ temporel » lié au concept de « musique intuitive » et de rythme physiologique propre à chaque interprète auquel il laisse, dans ses compositions, une marge de liberté. Il l'invite ainsi à jouer « le plus vite possible » ou « le plus lentement possible », autrement dit, à faire ce qu'il peut, vu l'extrême complication des partitions : par exemple, dans le Klavierstück XI, constitué de 19 groupes d'accords proposés à l'interprète qui les choisit et les enchaîne à son gré. Le pianiste construit lui-même la forme de l'œuvre, indéterminée au départ, en accordant selon ses possibilités, ces champs temporels aux actions demandées par le compositeur. Ce faisant, il établit une relation entre le temps quantitatif mesuré et le temps qualitatif ou vécu, tout en introduisant une certaine forme aléatoire qui rappelle l'indétermination des atomes dans la physique quantique, amenés à occuper des positions différentes sans changer le sens global du phénomène.

Que ce soit dans la musique électronique ou dans la musique instrumentale, l'idée demeure la même : ce ne sont plus seulement les hauteurs qui importent dans la musique mais toutes les composantes du son, subordonnant l'ensemble des temporalités à un principe général. Ainsi, la notion de temps sphérique est apparue chez certains compositeurs cherchant à faire tenir ensemble passé-présent-futur en un seul bloc composé de diverses strates temporelles ayant chacune sa vitesse propre, tout en mêlant des extraits de musiques très variées, d'époques et de genres différents. L'opéra est un lieu privilégié pour faire entendre cette pluralité de temporalités manifestes en particulier dans *Les soldats* (1965) de B.A. Zimmerman (1918-1970)⁴⁴ qui fut l'élève de Stockhausen ou dans *Les Trois Sœurs* (1998) de Péter Eötvös (1944) (également un proche du compositeur) pour évoquer un temps qui n'avance pas.

Tous ces compositeurs font entendre cette multiplicité d'espace-temps hétérogènes, évoquée par Bachelard dès 1938 dans sa conception plurielle d'un espace-temps jamais donné mais toujours à construire comme une superposition d'instant.

Son sphérique et Temps profond : G. Scelsi

Le compositeur Giacinto Scelsi (1905-1988) a développé au même moment que Stockhausen la notion de « sphéricité du son » (1953-[54]) qu'il décrit dans « Son et musique »⁴⁵ :

Le son est sphérique. Il est rond⁴⁶. Tandis qu'on l'écoute toujours en durée, en hauteur. Ce n'est pas du tout cela. Toute chose qui est sphérique a un centre. On peut le

⁴⁴ Par exemple, le compositeur superpose 11 scènes (là où Jakob Lenz, l'auteur de la pièce, prévoyait 11 changements de lieux pour les personnages de sa pièce).

⁴⁵ Scelsi, G., « Son et musique », *Les anges sont ailleurs...* Arles, Actes Sud, 2006.

⁴⁶ Bachelard décrit dans les mêmes termes l'oiseau, « (presque) tout sphérique » il est un modèle d'être, un absolu, l'être de la vie ronde », Bachelard, G., *La poétique de l'espace*, PUF, 1957, p.212.

démontrer scientifiquement. Il faut arriver au cœur du son, alors on est musicien. Sinon on est un artisan. Être un artisan de la musique c'est très respectable. Mais on n'est pas un vrai musicien ni un vrai artiste.⁴⁷

Cette affirmation implique d'entrer dans les mouvements internes au son pour y découvrir une troisième dimension : la profondeur. Si celle-ci nous échappe c'est que nous nous focalisons sur les hauteurs et les durées. Mais elle existe bien et elle apparaît dans l'écoute d'un seul son :

Vous n'avez pas idée de ce qu'il y a dans un seul son ! (...) C'est en jouant longtemps une note qu'elle devient grande. Elle devient si grande que l'on entend beaucoup plus d'harmoniques et elle grandit au dedans. Le son vous enveloppe. (...) Dans le son, on découvre un univers entier avec des harmoniques que l'on n'entend jamais. Le son remplit la pièce où vous êtes, il vous encercle. On nage à l'intérieur.⁴⁸

Les Quattro pezzi su una nota sola ([1959]) en sont un exemple probant. Chacune de ces quatre pièces est fondée sur une note unique jouée par un orchestre de chambre, selon des tempi et des attaques variées. En attirant l'attention sur cette profondeur du son et du temps, Scelsi fait penser la musique d'une tout autre façon. Ecouter la profondeur du son oblige à penser la musique en termes d'énergie, c'est-à-dire de vie (et non pas l'enfermer dans un cadre formel immuable). Son émergence est « nécessairement ondulatoire » affirme Bachelard⁴⁹ pour qui cette énergie, appliquée à la matière, est proche de l'énergie quantique et ondulatoire.

Musique quantique et temps ondulant

L'espace-temps de la matière-énergie

« Il n'y a qu'une seule matière homogène mais celle-ci peut exister sous divers états discrets et stationnaires »⁵⁰ explique le physicien Werner Heisenberg (1901-1976) qui observe : « lorsque deux particules élémentaires entrent en collision, elles se transforment en une matière nouvelle sous l'effet de l'énergie motrice qui les anime »⁵¹ D'après le physicien, l'énergie c'est-à-dire « ce qui fait se mouvoir » est la cause première de tout changement : « l'énergie peut aussi bien se transformer en matière qu'en chaleur ou en lumière »⁵².

⁴⁷ Scelsi, G., op. cit., p. 64.

⁴⁸ Scelsi, G., op. cit., p. 77.

⁴⁹ Bachelard, G., 1989 [1936], op. cit., p., 139.

⁵⁰ Heisenberg, W., La nature et la physique contemporaine. Paris, Gallimard, 1962, p. 54.

⁵¹ « Lorsque deux particules élémentaires douées d'une grande énergie motrice entrent en collision, le choc fait naître de nouvelles particules élémentaires et les particules originelles se transforment en une matière nouvelle. La manière la plus simple de décrire le phénomène est de dire que toutes les particules sont faites de la même substance et qu'elles ne représentent que des états divers et stationnaires de la même matière. De ce fait, le nombre TROIS des éléments de base se réduit encore une fois au nombre UN » in *Ibid.*

⁵² Heisenberg, W., op.cit., p. 68.

Que la matière se transforme en rayonnement ondulatoire et que le rayonnement ondulatoire se transforme en matière, c'est désormais un des principes de la Physique contemporaine.⁵³

Dotée de ces caractères ondulatoire et rythmique, la matière n'existe et ne perdure que sur le plan du rythme, seul moyen de préserver son énergie d'*existence*. « Le chimiste fera bientôt des substances avec de l'espace-temps symétrisé et rythmé », observe Bachelard car la matière contient des fréquences. Ainsi, quand il affirme que « toute structure s'accompagne d'une mise en harmonie de rythmes multiples » il semble proche de la théorie temporelle de Stockhausen et ses constructions de timbres par superposition de tempi différents : « La vie, nous dit Bachelard, est faite de temps bien ordonnés ; elle est faite verticalement d'instants superposés richement orchestrés »⁵⁴.

Le caractère pluriel et contradictoire de cette nouvelle réalité la rapproche de cette harmonie des contraires propre à « l'art de musique », autre nom donné à l'alchimie, dans laquelle la couleur (le timbre en musique) est le but⁵⁵.

Logique du contradictoire et Temps discordant

Confrontés à un réel voilé, incertain (cf. le principe d'indétermination d'Heisenberg, 1927) et contradictoire, les physiciens ont dû se mettre en quête d'une nouvelle logique, ou « logique du contradictoire » révélée par Stéphane Lupasco (1900-1988)⁵⁶ dans un ouvrage commenté par Bachelard dont le rationalisme « ouvert » peut envisager une « pluralité de logiques »⁵⁷.

L'auteur y affirme que la contradiction est consubstantielle à la réalité et que toute actualisation est conjointe à une potentialisation antagoniste. Bachelard ne manque pas de noter l'importance de « la contradiction comme moteur de l'énergie »⁵⁸ en soulignant le caractère *actif et* nécessaire (comme le sont les dissonances ou les harmoniques en musique).

C'est ce que perçoivent intuitivement les artistes, voués à produire des fleurs avec de la boue (cf. *Les Fleurs du Mal* de Baudelaire ou la série des *Nymphéas* de Monet, ces « merveilles de la boue », « toujours jeunes » cherchant à *dire l'instant*

⁵³ Bachelard, G., 1989 [1936], op. cit., p., 130.

⁵⁴ Bachelard, G., *ibid.*, pp. 131, 132 et 139.

⁵⁵ La transmutation des matières se réalise en trois étapes : l'œuvre au Noir, l'œuvre au Blanc et l'œuvre au Rouge (donné parfois dans un autre ordre : du Noir au Rouge et au Blanc).

⁵⁶ Lupasco, S., *Logique et contradiction*. Paris, PUF, 1947. Ouvrage commenté par Bachelard dans la *Revue philosophique de la France et de l'étranger* (1942-1943).

⁵⁷ Cela l'a conduit à soutenir S. Lupasco (l'un de ses élèves) et sa logique des contradictions comme moteur d'énergie développée dans ses livres: Lupasco., S., *Le principe d'antagonisme et la logique de l'énergie*, Paris, Hermann, 1951 ou Lupasco., S., *Logique et contradiction* Paris, PUF, 1970 ou encore, Lupasco., S., *L'énergie et la matière psychique* Paris, Julliard, 1974.

⁵⁸ Lupasco, S., *Le principe d'antagonisme et la logique de l'énergie*. Paris, Hermann, 1987 [1951].

*d'aurore*⁵⁹. Car, dans le domaine du symbolique dont procède l'art, toute chose peut être à la fois elle-même et son contraire. Il s'agit d'une loi poétique et scientifique (« toute valeur doit être conquise sur une anti-valeur »⁶⁰) qui est au fondement de sa philosophie, une *philosophie du non*⁶¹ incluant le négatif : car sous le Rouge il y a le noir, comme le sait l'alchimiste ou le poète (« Au fond du jaune il y a le noir »⁶²) sensible à « la secrète noirceur du lait »⁶³. Cette *relation harmonique entre deux contraires*⁶⁴ est inhérente à l'instant poétique (qui est au fondement de la conception du temps chez Bachelard) et à la musique, définie comme « l'ambiguïté érigée en système »⁶⁵. En tant qu'*harmonie des contraires*, elle déploie son énergie dans un temps vertical et « discordant »⁶⁶, jouant avec les forces aériennes et terrestres, comme l'oiseau (l'alouette) à la fois corpuscule et onde de joie. Augmentant d'intensité à mesure qu'il s'élève dans l'air, sa musique s'enrichit d'harmoniques pour produire un univers sonore en expansion qui est source de joie (« L'alouette n'exprime pas la joie de l'univers, nous dit Bachelard : elle l'actualise »⁶⁷.)

Conclusion

En tant que *jeu avec les forces*, la musique est un moyen d'exprimer, dans un autre langage, la nouvelle conception (éminemment poétique) du temps révélé au tournant du XXe siècle où s'opère une importante mutation dans la science comme dans les arts. Pensée en termes d'énergie, à partir du son, créateur d'un temps pluriel et discordant, ondulant au rythme de ses battements, la réalité de ce monde micro acoustique (au pouvoir cosmogonique chez certains musiciens) est proche de celle des physiciens, retrouvant un rapport musical à la matière-énergie.

En créant ces petites « maisons de temps » où chacun peut vivre les sons-oiseaux (donc le temps) d'une manière singulière et s'envoler avec eux, Stockhausen pensait transformer les humains en des êtres « polyphoniques », « multiples », et par là, « supérieurs », car capables d'entendre (et de vivre) plusieurs mondes ou plans sonores à la fois. Tel était selon lui l'homme de l'avenir, susceptible d'une mutation de soi indissociable de l'écoute de la pluralité des mondes, suggérée par la science et réalisée dans la musique par la technique.

⁵⁹ Bachelard, G., 1970, op. cit. p.10.

⁶⁰ Bachelard, G., *La terre et les rêveries du repos*, Paris, José Corti, 1948, p. 40.

⁶¹ La philosophie du non, écrit Bachelard, n'est pas une volonté de négation...La négation doit permettre une généralisation dialectique. La généralisation par le non *doit inclure ce qu'elle nie* » Bachelard, G., *La philosophie du non*. op. cit., Quatrième de couverture.

⁶² Guillevic, E., *Exécutoire*. Paris, Cahiers du sud, n° 230.

⁶³ Bachelard, G., 1948, op. cit. p.25.

⁶⁴ Bachelard, G., 1931, op. cit., p. 104.

⁶⁵ Définition donnée par le compositeur Adrian Leverkühn dans Mann, Th., *Docteur Faustus*, Paris, Albin Michel, 1974, p. 74.

⁶⁶ cf. l'intuition d'Héraclite selon laquelle c'est du conflit que naît la plus belle harmonie car « tout se fait par discorde »

⁶⁷ Bachelard, G., 1943, op. cit., pp. 103 et 106.

G. Scelsi est un cas exemplaire de cette nouvelle façon d'écouter le son, en existant en lui, pour qu'il devienne un *milieu* où nous avons lieu d'être : « Il y a dans le son... tout le cosmos entier qui remplit l'espace. Tous les sons possibles contenus en lui »⁶⁸. De même, Bachelard affirme (via Shelley) : « Pas d'espace sans musique parce qu'il n'y a pas d'expansion sans espace »⁶⁹ : le son nous ouvre un temps musical inédit où chacun peut devenir une force qui croît et s'élever dans l'espace comme l'alouette-musique, emblématique de cet éternel présent, « charnel et pulsatile »⁷⁰, sans passé ni futur, auquel les poètes nous rendent sensibles : le vol d'un oiseau, une fleur qui s'ouvre, une flamme qui monte, incarnent le vif de l'univers, cet instant de vie d'où naît la pensée du poète, du musicien et du scientifique. C'est pourquoi seule *la partie vibrante de notre être*, ce ciel interne peuplés d'oiseaux de silence et de sons, peut comprendre « la théorie ondulatoire de l'alouette »⁷¹ qui est à vivre dynamiquement comme une musique quantique que nous portons en nous sans en avoir conscience. Car nous vivons dans un *Monde* qui est peut-être *l'incarnation de la musique et du temps présent*⁷² comme le pensait Schopenhauer et *réglé sur une mesure musicale imposée par la cadence des instants* selon Bachelard⁷³. En musicien, Bachelard l'entend comme un grand orchestre⁷⁴ par lequel tous les vivants communiquent pour créer leur milieu, à l'instar de Murray Schafer⁷⁵, apportant ainsi sa contribution à cette musicalité de l'existence célébrée par Nietzsche (*La vie est musique*) et approchée par les scientifiques dans leurs recherches sur le temps et la matière-énergie. En développant sa philosophie de l'instant, à la fois poétique et musicale, Bachelard nous incite à vivre dans un pur présent sans passé ni futur, comme l'oiseau qui se maintient dans l'Ouvert et demeure ainsi « libre de mort »⁷⁶.

Marie-Pierre Lassus

Université de Lille

marie-pierre.lassusuniv-lille.fr

⁶⁸ *Ibid.*

⁶⁹ Bachelard, G., 1943, op. cit., p. 62.

⁷⁰ Lawrence, D-H., « La poésie de l'instant présent », Katz-Roy, G., Librach, M. (eds.), D. H. Lawrence, Cahier de L'Herne, n° 56, 1997, p. 51.

⁷¹ Bachelard, G., 1943, op. cit., p. 101.

⁷² Schopenhauer, A., *Le monde comme volonté et comme représentation*, tr. fr., par A. Burdeau, édition revue par R. Roos. Préface de Clément Rosset. Paris, PUF, Quadrige, (2014) [1813], p. 336.

Bachelard, G., *L'intuition de l'instant*, op. cit. p. 46.

⁷³ Bachelard, G., *L'intuition de l'instant*, op. cit. p. 46.

⁷⁴ Bachelard, G., *ibid.* p. 47. « Dans le grand orchestre du Monde, nous dit Bachelard, il y a des instruments qui se taisent souvent mais il est faux de dire qu'il y a toujours un instrument qui joue ».

⁷⁵ Schafer, R.M., *The Tuning of the World (The Soundscape)*, Knopf, 1977. traduit par *Le paysage sonore, le monde comme musique*, Marseille, éditions Wild Project, 2010.

⁷⁶ Rilke, R-M., Huitième élégie, *Les élégies de Duino*, (la huitième) traduction et postface de Philippe Jaccottet, La Dogana, Genève, 2008. « L'Ouvert, dans la vue de l'animal est si profond. Libre de mort ».

Éléments bibliographiques

- Albera, Ph., *Karlheinz Stockhausen. Comment passe le Temps. Essais sur la musique, 1952-1961*, tr. fr., C. Meyer., Paris, Contrechamps, 2017.
- Bachelard, G., « Noumène et microphysique », *Recherches philosophiques*, I, 1931-1932, 55-65.
- Bachelard, G., *L'intuition de l'instant*, Paris, Stock, 1992 [1932].
- Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, PUF, Alcan, 1983 [1934].
- Bachelard, G., *La dialectique de la durée*, Paris, PUF Quadrige, Boivin, 1989 [1936].
- Bachelard, G., *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine*, Paris, Alcan, 1937.
- Bachelard, G., *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, 1977 [1938].
- Bachelard, G., « Instant poétique et instant métaphysique » *Revue Messages : Métaphysique et poésie*, 2 1939. *L'intuition de l'instant*. (1992) 103-111.
- Bachelard, G., *La philosophie du non*, Paris, PUF, 1940.
- Bachelard, G., *L'air et les songes. Essai sur l'imagination du mouvement*, Paris, José Corti, 1943.
- Debussy, C., *Monsieur Croche et autres écrits*, Paris, Gallimard, 1987.
- d'Espagnat, B., *Le réel voilé. Analyse des concepts quantiques*, Paris, Fayard, 1994.
- D'Espagnat, B., *Traité de physique et de philosophie*, Paris, Fayard, 2002.
- Heisenberg, W., *Physique et Philosophie*, Paris, A. Michel, 1961.
- Heisenberg, W., *La nature dans la physique contemporaine*, Paris, Gallimard, 1962.
- Heisenberg, W., «The nature of elementary particles», in E., Castellani (ed.), *Interpreting Bo-dies: classical and Quantum Objects in Modern Physics*, Princeton, Princeton University Press, 1998.
- Lassus, M-P., *Bachelard musicien. Pour une philosophie des silences et des timbres*, Lille, Presses Universitaires du Septentrion, 2010.
- Lupasco, S., *Logique et contradiction*, Paris, PUF, 1947.
- Lupasco, S., *L'énergie et la matière psychique*, Paris, Julliard, 1974.
- Lupasco, S., *Le principe d'antagonisme et la logique de l'énergie*, Paris, Hermann, 1987 [1951].
- Mann, Th. *Docteur Faustus*, Paris, Albin Michel, 1974.
- Rilke, R.-M., *Sonnets à Orphée*, Paris : Pleiade, II, 1, 1997.
- Rilke, R.-M., *Les élégies de Duino*, traduction et postface de P. Jaccottet, La Dogana, Genève, 2008.
- Schafer, R.M., *The Tuning of the World (The Soundscape)*, New York, Knopf, 1977.
- Schopenhauer, A., *Le monde comme volonté et comme représentation*, tr. fr., A. Burdeau, édition revue par R. Roos, Préface de Clément Rosset, Paris, PUF Quadrige, 2014 [1813].
- Sciarrino, S., *Le Figure della Musica*, Ricordi, Milan, 1998.
- Spinoza, B., *Éthique*, tr. fr., G. Appuhn, Paris, Flammarion, 2008 [1677].
- Stockhausen, K., *Rencontres Internationales d'art contemporain*, La Rochelle 28/08/1974 <https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/les-nuits-de-france-culture/conference-de-karlheinz-stockhausen-aux-rencontres-internationales-d-art-contemporain-9815071>
- Stockhausen, K., ... *How Time Passes...*, trad. Cornelius Cardew. Die Reihe 3 « Artisanat musical », 1959, Londres, Universal edition, 1957, 10-40.
- Stravinsky, I., *Chroniques de ma vie*, Paris, Denoël, 1962 [1935].

Pierre Martin-Dussaud

Five surprises about the physics of time

The question of time has been debated and revisited countless times, leading me to doubt whether I have anything new to contribute to the discourse. The abundance of literature on the subject often feels like a discouraging indication that we are no closer to grasping anything that transcends common sense. Purely philosophical explorations of the concept rely on painstaking introspection, accompanied by linguistic analysis and insightful quotes from thinkers like Plato and Augustine. As a high school student, I found these extensive discussions unsatisfying, yielding little tangible outcome. However, as I embarked on my academic journey and delved into research, I gradually realized that there was more to be said about time, provided I was willing to engage with the mathematics of modern physics.

The concept of “time” is special as it exists both in everyday language and scientific theories. Unlike “electron,” which had no existence in common language, or “fire,” which has vanished from scientific discourse, “time” has transitioned into a scientific concept with the aid of a technological invention – the clock. The advent of the pendulum clock by Huygens in 1657 marked the initial significant step in the *phenomenotechnical* invention of time. Later steps were achieved by technical tools, either technological, mathematical or conceptual.

Understanding time means overcoming the epistemological obstacles that obstruct the path from common language to scientific theories. A meaningful philosophy of time should focus on the gradual transformations that have reshaped what physicists refer to as time. Drawing from my personal experiences, I have identified five crucial insights that struck me during my journey of learning, representing genuine progress in understanding the nature of time. Each of these surprises will constitute a section of this article:

1. Time means different things in different contexts
2. The present is full of space
3. The arrow of time is the result of a blurred vision
4. Classical mechanics can be expressed without time
5. Quantum time holds future surprises in store

1. Time means different things in different contexts

There is a common linguistic temptation to take the existence of a noun for the sign of the existence of an underlying tangible reality, thus yielding an inclination to treat time as a concrete entity. However, with a word as encompassing as time, natural languages offer a wide variety of uses, which lack coherence as a whole. Attempting to establish a singular definition of time that encompasses all its linguistic usages carries the risk of disappointment, often resulting in a minimalist and vague definition that offers little utility in understanding its nature.

It is a first useful trick of dialectic games to admit the polysemy of words. A second helpful moment of the scientific analysis is to recognize that a word does not command the existence of a physical reality, and that we must therefore strive to gradually separate the physical invariants from their linguistic gangue. To attain scientific rigor, time must be dissected into various notions, each approached through distinct methods and objectivized by a different apparatus.

Consequently, we encounter different physical theories, each employing time in its unique manner, albeit sharing certain similarities. We can establish a hierarchical structure of theories based on their proximity to our preconceived notion of time:

1. Psychology operates with a complex and subjective time characterized by varying durations dependent on mood.
2. Thermodynamics incorporates a universal and directional time.
3. Classical physics incorporates a universal but non-directional time.
4. Special/general relativity employs a non-directional time lacking a global order.
5. Quantum gravity involves a non-directional time without a global order, potentially devoid of objective duration, possibly discrete, or even fuzzy.

As we descend the hierarchy, time gradually diminishes and becomes elusive. This is why some individuals assert that “time doesn’t exist”. While this statement may seem provocative, it encapsulates the idea that our intuitive understanding of time emerges as a derived notion, similar to how the concept of a water’s surface emerges from a molecular theory where the notion of surface is absent.

The dissection of the problem of time into sub-problems tied directly to specific theories or experiments serves as an initial analytical approach to navigate the intricacies of the subject. There will remain a synthetic task of understanding how these levels can be interconnected and articulated with one another.

2. The present is full of space

In Newtonian physics, spacetime is conceptualized as a 4-dimensional manifold with a global foliation that defines slices of simultaneity. The present is a thin 3-dimensional hyperplane situated between the vast expanses of the future and the past.

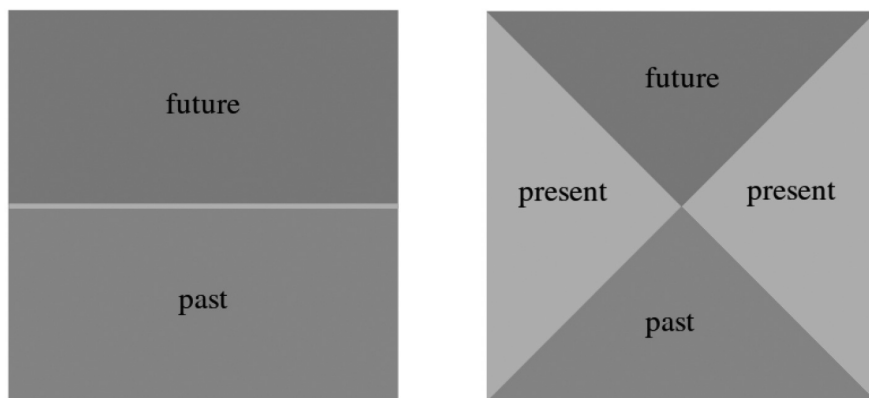


Figure 1. Newtonian spacetime (left). Minkowski spacetime (right).

However, Einstein's work demonstrates that there are events that cannot be consistently ordered in time, leading to the realization that there is no global time foliation of spacetime. In Minkowski spacetime, the structure of spacetime is characterized by a 4-dimensional manifold with a light cone at each point, serving as the boundary of past and future events. In the region between, events exist at a *space-like* distance, not belonging to either the past or the future.

The conventional presentation in textbooks provides technical clarity, yet it leaves one pondering the significance of this unexpected region of space-like separated events, which emerges as a true novelty brought by special relativity. In his popular book *La realtà non è come ci appare* (2014), Carlo Rovelli daringly refers to this region as the *present*. The term is more usually kept to refer to a slice of simultaneity that is relative to the velocity of the reference frame, which makes the only non-relative present be at the origin of the reference frame. In contrast, Rovelli suggests calling the present the collection of events that are neither in the future nor in the past.

The choice of terminology is not crucial to scientific research but holds significance in aligning our intuition as closely as possible with the picture of reality depicted by physics. Einstein compels us to question what we define as the present: is it the class of simultaneous events or the class of events that are neither past nor future? The former approach links the present to the notion of simultaneity, leading to the present being relative to both the position and the velocity of the observer, while the past and the future are only relative to its position. This hierarchy of concepts that poses simultaneity as primary and present as secondary is not a natural choice. Additionally, if the present is defined conventionally as a slice of simultaneity, what term would one use to describe the non-empty set of events that are not future, past, or present? The latter approach, on the other hand, aligns with a philosophical tradition that considers the present solely through the negation of its belonging to the future or the past. Adopting this perspective allows us to

retain the concept of the present within the framework of special relativity, which, in my opinion, is a better choice for the pedagogical aim of minimally modifying our everyday language.

Thus far, I have not encountered any detrimental consequences of this choice. On the contrary, I find satisfaction in this conservative adjustment as it adheres to the principle of simplicity, refining our language without inflating it. Compared to the Newtonian model, the present now exists in four dimensions, similar to the past and the future. Except for the origin, it remains inaccessible to any traveler moving at speeds below that of light.

3. The arrow of time is the result of a blurred vision

In special relativity, the labels of past and future are purely conventional, meaning they could be interchanged without anyone noticing. Indeed, the theory itself does not prescribe a direction of time. At the kinematical level, the convention typically defines the future as the direction of increasing time t . However, at the dynamical level, if $x(t)$ is a solution to the equations of motion, then $x(-t)$ is also a valid solution. Hence, apart from the arbitrary labeling of clocks with an increasing series of numbers, nothing distinguishes the past from the future. Special relativity does not have an arrow of time. The same holds true for electrodynamics and general relativity, as Einstein's equations and Maxwell's equations are time-reversal symmetric.

Understanding the origin of the experienced arrow of time has been a central question in thermodynamics. Our initial impression of time is profoundly asymmetrical: we remember the past but not the future. The first answer provided by thermodynamics may seem tautological, as it introduces a new concept, entropy, and declares that “*the future is the direction of increasing entropy*”:

$$dS > 0.$$

This equation introduces time-orientation in physics. It is a thermodynamic equation and, therefore, not fundamental. Physicists have been wondering how to derive it from statistical physics, which relies on the symmetrical equations of dynamics.

Although not all physicists would agree, I find that the most satisfactory explanation has been given by Jaynes and can be summarized as “the arrow of time is the result of a blurred vision”¹. Adopting the perspective of Laplace's demon, who can observe all microscopic degrees of freedom, it becomes impossible to determine whether an evolution is forward or backward; both directions describe equally plausible dynamical evolutions. The situation is different if the demon has only access to a limited set of degrees of freedom. A macroscopic state is a set of va-

¹ E.T., Jaynes, *Gibbs vs Boltzmann Entropies*, American Journal of Physics, 33, 391, (1965), doi: 10.1119/1.971557.

lues for an incomplete selection of macroscopic quantities. Physicists postulate the existence of an underlying microscopic state, which can only be inferred from the values of the macroscopic variables. This inference is described by a probability distribution W over the phase space, where the microscopic state is guessed with certain probabilities. The “best guess”, using all the available information without making extra-assumptions, corresponds to maximizing the Gibbs entropy

$$S = - \int W \log W$$

while maintaining fixed the macroscopic values.

The maximum Gibbs entropy for a given macroscopic state is referred to as the thermodynamic entropy. The system is in equilibrium when the values of the macroscopic variables do not change over time. When the system is out of equilibrium, its time evolution leads to different macroscopic states at different times, each corresponding to different values of thermodynamic entropy. Starting from a given macroscopic state, the Hamiltonian evolution of the distribution W (aka Liouville flow) preserves the value of the Gibbs entropy. However, the values of the macroscopic variables change, so that the thermodynamic entropy changes as well, in way which, by definition, can only increase further the value of S .

Crucially, the arrow of time depends on the choice of macroscopic variables that imposes a blurred vision of reality. This implies that a different selection of filters could potentially yield a different arrow of time, which is reminiscent of the mixing paradox. Therefore, the orientation of time is not fundamental but rather dependent on a particular point of view, a blurred vision of reality. This is a striking example of a property of time, *irreversibility*, which physics has successfully traced back to its origin.

Five surprises about the physics of time

4. Classical mechanics can be expressed without time

The modern formulation of mechanics employs symplectic geometry, which is explained in various textbooks as follows:

1. The phase space is described by a symplectic manifold.
2. The action is the integral of a local area, called the symplectic form.
3. The Hamiltonian is a function over the phase space, and its differentiation yields a vector field that defines the flow of time.

Unfortunately, this description is not compatible with Galileo’s principle of relativity. In other words, the Galilean group does not act as a symplectomorphism on the phase space, meaning that it does not preserve the symplectic form. In simpler terms, the phase space described above represents a space of initial data, and the dynamical evolution is described within a fixed reference frame, disregarding the possibility of changing the reference frame throughout the time evolution.

In his book *Structure des systèmes dynamiques* (1970) Jean-Marie Souriau clearly highlighted this issue and proposed an elegant solution to overcome the difficulty

and achieve a covariant description. The key is to view the phase space as a space of possible motions, i.e. solutions of the equations of motion, rather than a space of initial data. Both spaces are isomorphic, as there exists a one-to-one correspondence between initial data and motions. However, the latter approach avoids imposing an arbitrary time frame for describing the motion.

The space of solutions for a given physical equation e.g., Einstein, Newton may be a complicated space but is at least a symplectic space. A point in this space represents a complete trajectory of motion. Consequently, time evolution is not described by a Hamiltonian but is incorporated in the new symplectic form of the covariant phase space. As a result, the symplectic form remains invariant under the action of the Galilean group, thereby restoring covariance.

Therefore, there exists a concise method to describe classical physics without an explicit time flow. This description proves powerful to perform a paradigm shift from Newton to Einstein: instead of imposing invariance under the Galilean group, the phase space of special relativity must be invariant under the Poincaré group. Additionally, this formulation sheds light on the “problem of time” in quantum gravity, which physicists have raised due to the observation that the Hamiltonian of general relativity vanishes. This actually holds true for any generally covariant theory but should not deter physicists seeking to describe an evolution. In fact, different variables can be used to depict the evolution along a trajectory. Time is not inherently special but rather a *gauche* choice for describing motion. For example, the motion of a pendulum can be described by its position relative to the time displayed on a watch, which could simply be the position of another pendulum.

Hence, despite the apparent emphasis on time in the conventional formulations of classical mechanics, a complete assimilation of the principle of relativity suggests placing all variables on a more equal footing, and classical physics can function effectively within a covariant phase space.

5. Quantum time holds future surprises in store

Quantum physics has introduced a range of sophisticated techniques that hold the potential to revolutionize our understanding of time. However, this transformation has yet to occur, as quantum physics has mainly been applied within a regime where time behaves similarly to classical physics. Exploring the profound impact of quantum physics on the concept of time remains one of the key objectives of quantum gravity.

Quantum gravity should incorporate the lessons on time learned from previous theories, which have gradually stripped away some of its fundamental attributes such as universality and direction. Certain properties of time, such as its continuity, still remain open to investigation and potential revision. Currently, researchers are actively exploring this uncharted territory, and in the following sections, I will present three modern hypotheses that challenge conventional notions about time.

A. Causal order may be superposed

In 2011, Oreshkov, Costa, and Brukner have found that quantum mechanics allows for the description of processes without assuming a fixed global causal order in which they are embedded. They introduced a formalism known as process matrices, which allows for the superposition of causal orders, where process A occurs before process B *and* B occurs before A. Astonishingly, certain process matrices cannot be described by superpositions of causal order and are termed causally nonseparable.

In quantum gravity, the superposition of causal order is anticipated as a natural consequence of the superposition of the gravitational field. To date, no experiments have been conducted to directly test this hypothesis. Nonetheless, the field of quantum foundations is actively exploring this concept.

B. Time may be discrete

One notable prediction of loop quantum gravity is the discreteness of space: area and volume are observables with discrete spectra. This implies the existence of a fundamental unit or chunk of space characterized by a minimum nonzero volume.

Considering the lorentzian symmetries between space and time, it becomes tempting to entertain the idea that time itself may also be discrete. However, precisely formulating this notion requires the definition of a time operator that acts on a suitable Hilbert space, which has yet to be accomplished.

Speculating based on this hypothesis, there would exist a minimum duration, likely on the order of the Planck time:

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

The Planck time is incredibly minuscule, to the extent that it may seem implausible to find a clock precise enough to test this hypothesis. Currently, the most accurate optical clocks employing strontium have a period of approximately 10^{-15} seconds. However, physicists can potentially compensate for imprecision using statistical methods. For instance, they can determine with confidence that the top quark has a lifetime of approximately 10^{-25} seconds. Together with my colleagues, I have proposed an experiment that could theoretically test the possibility of time discreteness². Although this experiment remains a distant endeavor, it highlights the significance of exploring this question and the potential for making testable claims.

² M. Christodoulou, A. Di Biagio, P. Martin-Dussaud, *An experiment to test the discreteness of time*, Quantum 6 (2022), doi: 10.22331/q-2022-10-06-826.

C. Light cones may be pathological

Within the framework of spinfoams, spacetime is described by a discrete structure known as a spinfoam. It can be visualized as a two-dimensional graph consisting of vertices, edges, and faces. It represents the time evolution of a spin-network, which depicts quantum state of space in loop quantum gravity. The transition amplitude between two states of the gravitational field can be computed as a summation over spinfoams, employing rules akin to Feynman diagrams.

The vertex of a spinfoam represents a fundamental discrete unit of spacetime. In collaboration with Bianchi³, I have demonstrated that the local causal information is encoded on ten *wedges*, which are 2-dimensional objects surrounding the vertex. These wedges can be categorized as “time-like” or “space-like.” To construct a coherent local light cone, the wedges must align in a specific manner, which is not always guaranteed. Surprisingly, at the quantum level, there can exist configurations of wedges that fail to form a proper light cone. This leads to the existence of a multitude of pathological light cones, for instance with only one cone instead of two, or no cone at all, purely space, purely time, or all mixed together. Of course, these strange configurations are suppressed in the classical limit to yield the well-ordered spacetime we are familiar with.

* *
*

In *La formation de l'esprit scientifique* (1934), Gaston Bachelard emphasizes that progress in science is achieved through abstraction and distancing from naive conceptions. This rings particularly true on the topic of time, where the modern developments of our understanding necessitates a language free from concrete representations. However, as physics delves into greater levels of abstraction, the language used by physicists becomes increasingly devoid of common terms. The seemingly naive yet meaningful questions one may initially pose about time gradually dissolve, lacking appropriate words to even formulate the inquiry. The abstraction of the answers goes hand in hand with a transformation of the questions. The process of elevating common questions to expert-level inquiries is a rare occurrence. Achieving this endeavor without distorting the initial question is a challenge for the philosophicists. The latter are not particularly concerned with whether a peculiarly defined operator possesses a discrete spectrum; rather, their interest lies in knowing whether they can reasonably envision the flow of time as a coarse-grained representation of a rapidly changing sequence of images. The remnant of the everyday notion of time in quantum gravity is so drastically different and minimal that one can argue in favor of the claim that “time does not exist”.

The five surprises regarding the physics of time represent significant milestones that have given me a sense of understanding. Nowadays, the question “what is

³ E. Bianchi, P. Martin-Dussaud, *Causal structure in spin-foams* (2021), arXiv: 2109.00986.

time?” has become tedious to me. Not because I possess the answer, but because I have discovered more specific and refined questions to explore, using precise language and with clear objectives. Questions like, “What could be a time operator in quantum gravity?” or “How could the superposition of causal order be experimentally tested?” or even “How pathological can a light cone be?”. These new technical inquiries, constructed with sophisticated concepts, will yield phenomenotechnical answers, further expanding the realm of knowledge and understanding.

Pierre Martin-Dussaud

Basic Research Community for Physics
martindussaud@gmail.com

Bibliography

- Bachelard, G., *La formation de l'esprit scientifique. Contribution à une Psychanalyse de la connaissance objective*, Vrin, 1967.
- Bianchi, E., Martin-Dussaud, P., “Causal Structure in Spin Foams”, *Universe* 10, 181 (2024), doi: 10.3390/universe10040181.
- Christodoulou, M., Rovelli, C. “On the Possibility of Experimental Detection of the Discreteness of Time”, *Front. Phys.* 8, (2020), doi: 10.3389/fphy.2020.00207. Christodoulou, M., Di Biagio, A., Martin-Dussaud, P., “An experiment to test the discreteness of time”, *Quantum* 6 (2022), doi: 10.22331/q-2022-10-06-826.
- Jaynes, E. T., “Gibbs vs Boltzmann Entropies”, *American Journal of Physics* 33, 391 (1965); doi: 10.1119/1.1971557.
- Oreshkov, O., Costa, F., Brukner, C. “Quantum correlations with no causal order”, *Nat Commun* 3, 1092 (2012), doi: 10.1038/ncomms2076.
- Rovelli, C., *La realtà non è come ci appare*, Raffaello Cortina, 2014.
- Souriau, J.-M., *Structure des systèmes dynamiques*, Dunod, 1970.

Marc Lachière-Rey

Effets temporels dans les théories relativistes

Effets temporels

Je nommerai effet temporel relativiste (ETR) tout résultat d'une mesure faite par des horloges, qui diffère de celui prédit par la physique newtonienne tout en s'accordant avec les théories relativistes.

Ces effets peuvent être quantitatifs (par exemple les *décalages spectraux* ressemblent à l'effet Doppler usuel mais ils sont donnés par des formules différentes) ou qualitatifs (les *délais temporels* n'ont aucun équivalent en physique non relativiste). Ce sont des prédictions très précises des théories relativistes ; ils ont tous aujourd'hui été pleinement confirmés observationnellement et/ou expérimentalement, en parfait accord avec ces prédictions. Ils sont très bien évalués, aussi bien sur Terre que dans l'espace proche ou lointain (GPS), en astrophysique et en cosmologie. Passé le temps des confirmations de la relativité, ils sont maintenant utilisés comme outils d'exploration du cosmos en astrophysique et cosmologie, mais aussi sur Terre pour le repérage, l'altimétrie et la prospection, la géophysique, ...

On en distingue principalement deux types, *décalages* et *délais*. Pour chacun, une origine cinématique ou bien gravitationnelle est possible, les deux étant souvent coprésentes. Nous verrons un peu plus bas que les délais manifestent très directement le fait que les horloges ne mesurent pas le temps, ce qui met en question la pertinence de la notion dans notre monde physique.

Les *décalages cinématiques* peuvent être vus, au moins pour certains, comme une généralisation relativiste de l'*effet Doppler* bien connu, modifié par les théories relativistes. Les *décalages gravitationnels*, qualifiés d'"effet Einstein", n'ont aucune contrepartie en physique non relativiste car ils manifestent très directement la courbure de l'espace-temps.

Les *délais temporels*, quant à eux, correspondent à ce que certains qualifient improprement de *contraction des durées*, *dilatation du temps*, etc. Un tel délai se constitue de la différence entre les durées de deux histoires différentes, qui partagent cependant même fin et même commencement. Cette différence, évidemment absente en physique newtonienne, s'oppose à l'idée que les durées seraient une manifestation du temps. On se réfère surtout aux délais à travers l'expérience

de pensée des *jumeaux de Langevin*¹. Cette dernière est le plus souvent rapportée dans le cas purement cinématique mais comme pour les *décalages*, elle peut avoir aussi une origine gravitationnelle.

Tous ces effets découlent directement de la géométrie de l'espace-temps. Relativité restreinte et générale rendent compte de la même manière des effets cinématiques ; seule la relativité générale rend compte des effets gravitationnels, dus à la courbure de l'espace-temps. Nous verrons comment les *délais* peuvent s'analyser comme conséquence directe des *décalages* : le même phénomène est à l'œuvre, mais il se manifeste différemment selon les circonstances.

Préliminaires

Décalages et délais manifestent très directement les propriétés géométriques de l'espace-temps. Ils sont quelquefois (dans les vieux cours de physique relativiste) présentés comme des corrections à la situation newtonienne, et analysés en termes d'espace et de temps. Cela ne fonctionne cependant pas toujours, et mène le plus souvent à des contradictions, voire des absurdités.

Rappelons-nous que l'espace-temps relativiste se distingue de la conception newtonienne (espace et temps) par l'*invariance de Lorentz*. C'est elle qui implique l'absence de simultanéité et de chronologie objective ; historiquement, cette absence fut d'abord remarquée par Einstein et le conduisit à rejeter les notions d'espace et de temps, puis à construire sa théorie de la relativité restreinte. Hermann Minkowski put ensuite introduire le cadre de l'espace-temps dans lequel elle se décrit parfaitement de manière géométrique ; cadre que reprit ensuite Einstein (en le déformant) pour formuler sa relativité générale.

Les effets considérés ici concernent la notion fondamentale de *durée* (appelée plutôt *durée propre*). Il est important de comprendre que – en physique newtonienne comme einsteinienne – il s'agit de la seule quantité à caractère temporel qui soit mesurable². J'utilise le terme « horloge » pour qualifier n'importe quel dispositif de « mesure du temps » (une montre, une horloge atomique...), et l'*hypothèse des horloges* constitue l'un des premiers préceptes des théories relativistes : *une horloge mesure la durée propre de son histoire (et non pas le temps, ou du temps)*.

Le terme “histoire” qualifie toute succession continue d'événements, entre un événement initial et un événement final ; et toute histoire a une durée propre bien définie, mesurable uniquement par une horloge qui suit cette histoire. L'*hypothèse des horloges* eut du mal à être comprise et acceptée à l'époque d'Einstein, notamment par certains philosophes. Mais il n'y a aucun espoir de comprendre

¹ Voir par exemple During, É., « Langevin ou le paradoxe introuvable », *Revue de métaphysique et de morale*, n° 84, 2014, pp. 513-527 ; ou l'article du même dans cet ouvrage.

² Notons par exemple qu'une vibration, un rythme, une oscillation, un rayonnement..., se caractérisent par leur *période* (inverse de la fréquence) qui n'est rien d'autre que la durée de l'histoire élémentaire que constitue un battement. Notons aussi que le *rythme* d'un processus vivant (respiration, battement de cœur, digestion, sommeil, pensée...) ou un “temps ressenti” se représente toujours par une durée.

les effets temporels relativistes sans l'avoir assimilée. J'insiste : il n'existe en physique aucun type de mesure à caractère temporel autre que celle de la durée propre d'une histoire³.

Les ETRs, décalages et délais, s'interprètent de manière très directe dans l'espace-temps, pour autant que l'on remarque qu'ils concernent toujours des situations impliquant *deux histoires différentes*, dont les durées diffèrent alors que l'on s'attendrait naïvement (c'est-à-dire dans le cadre de la physique newtonienne) à ce qu'elles coïncident.

Les décalages temporels

Toute histoire a une durée propre parfaitement définie, mesurable par une horloge qui décrit cette histoire : ma montre (ou toute horloge qui m'accompagne) mesure la durée propre de mon histoire personnelle, et rien d'autre ne peut la mesurer : la durée propre d'une histoire n'est définie que pour celui qui suit cette histoire, et mesurable uniquement par lui.

Je puis cependant *observer* une autre histoire. Par exemple une histoire H que vit mon amie Hélène depuis son commencement C jusqu'à sa fin F. Avec son horloge, Hélène peut en mesurer la durée propre $d(H)$. Je ne puis faire la même mesure car je ne vis pas cette histoire H, et mon horloge non plus. Mais rien ne m'empêche de l'observer, par exemple visuellement ou en recevant n'importe quel signal qui en provient. Mon observation de l'histoire H est une autre histoire H', différente de H, vécue par moi et non pas par Hélène. Elle commence avec mon observation C' de l'événement C ; elle se termine avec mon observation F' de l'événement F. Mon horloge peut en mesurer la durée propre $d(H')$. Elle diffère de $d(H)$ et le *décalage temporel* est défini comme $z = d(H') / d(H) - 1$.

Le décalage (*temporel*) mesure la différence entre la durée propre d'une histoire et la durée propre de l'observation de cette histoire!

Pour le dire autrement, si l'horloge (d'Hélène) m'envoie un bip (un signal) chaque seconde, je reçois un bip chaque $1+z$ seconde. Deux origines sont possibles pour un décalage.

Le décalage cinématique

Il est causé par la vitesse relative V entre source et observateur, comptée positivement ou négativement selon qu'ils s'éloignent ou se rapprochent. J'exprime toujours V en unité de la vitesse de la lumière c ; cela revient à mesurer les longueurs en secondes (on dit plutôt en général secondes-lumière), ce qui correspond à la définition légale du mètre. Le décalage s'exprime par la formule $1+z = \sqrt{(1+V)/}$

³ Puisque ce que l'on mesure est toujours une durée [propre], il vaudrait mieux qualifier la seconde d'unité de durée (plutôt que de temps), tout comme le mètre n'est pas une unité d'espace, mais de longueur.

$(1-V)$), qui se développe approximativement selon $z = V + V^2/2 + \dots$, où les termes supplémentaires sont en général négligeables (sauf pour des vitesses extrêmes). La différence avec le décalage Doppler *non relativiste* apparaît puisque ce dernier, $z_{\text{Doppler}} = V$, se réduit à la contribution linéaire ; cette différence est cruciale car elle est à l'origine du phénomène de délai temporel (décrit plus bas) inexistant en physique newtonienne. La différence se manifeste également par le fait que la composante tangentielle (et non pas seulement radiale comme pour l'effet Doppler) de la vitesse relative intervient également.

[Encadré :

La formulation dans l'espace-temps suggère (plus commode et plus naturel) d'utiliser une notion géométrique plus fondamentale que celle de vitesse relative : la *rapidité* θ , qui géométriquement s'identifie à l'*angle hyperbolique* entre lignes d'univers. La rapidité remplace avantageusement la vitesse qui s'exprime par la fonction *tangente hyperbolique* comme $V = \tanh \theta$. Notons que ni l'angle θ ni la vitesse (toujours exprimée en unité de c) n'ont ici de dimension).

La trigonométrie hyperbolique, qui a cours dans l'espace-temps, indique que lorsque la rapidité θ varie de moins l'infini à plus l'infini, la vitesse v varie entre -1 et 1. Cela fait apparaître que la valeur limite (ce que l'on appelle vitesse de la lumière) vaut l'unité dans le bon système de coordonnées ; mais surtout que cette limite est totalement artificielle car elle ne fait que transcrire l'usage d'une grandeur mal adaptée : la vitesse plutôt que de la rapidité qui, elle, varie bien sans limite. Le décalage cinématique s'écrit $1+z = \exp \theta = 1 + \theta + \theta^2/2 + \dots$, ce qui se développe bien comme $z = v + v^2/2 + \dots$]

L'existence et les propriétés de ces décalages temporels ont été largement confirmées et mesurées. Un cas particulier est celui du décalage spectral.

Le décalage spectral

Un décalage temporel est dit « décalage spectral » lorsque l'histoire observée se constitue d'une unique oscillation du rayonnement (par exemple lumineux ou électromagnétique) émis par la source. Sa durée propre constitue par définition la période émise T_e , telle que la mesure l'horloge émettrice, celle de la source. L'observateur-récepteur reçoit le signal avec une période *reçue* T_r , qu'il mesure avec son horloge. Le décalage temporel (entre ces deux durées propres) $z = (T_r - T_e) / T_e$ est qualifié de *décalage spectral*. C'est une notion relativement familière puisqu'il se manifeste en physique classique (non relativiste) sous forme de l'effet Doppler habituel. On invoque souvent, pour le décrire, la sirène de l'ambulance : lorsqu'elle s'éloigne (*resp.* se rapproche), nous percevons son signal sonore avec une période (soit l'inverse de sa fréquence qui elle-même s'identifie à la « hauteur » du son) supérieure (*resp.* inférieure) à celle du signal émis. Ici le décalage (période reçue / période émise) est donné par la formule *non relativiste* $z_{\text{nr}} = v / v_{\text{son}}$, où la vitesse v de l'ambulance est rapportée à celle du son v_{son} .

Les décalages gravitationnels

Qualifié d'*effet Einstein*, il est engendré par la courbure de l'espace-temps. Dans les conditions de gravitation faible (par exemple sur Terre ou dans le Système Solaire), il est commode de la décrire par le potentiel gravitationnel ϕ (en unités de c^2). Le décalage s'écrit alors simplement $z = \delta\phi$, où $\delta\phi$ représente la différence entre les valeurs du potentiel aux positions de la source et de l'observateur.

Dans le potentiel gravitationnel terrestre par exemple, il se manifeste entre horloges à des altitudes différentes : pour une différence d'altitude δh , la relativité générale prévoit $z = g \delta h$ (où g est l'accélération de la pesanteur terrestre), soit environ 10^{-16} par mètre : une horloge à haute altitude semble battre plus rapidement que celle à plus basse altitude (rappelons qu'une horloge bat toujours au même rythme quoi qu'il arrive).

Les délais

Le délai *temporel* s'applique à la situation particulière où source et observateur décrivent bien deux histoires différentes, mais deux histoires qui partagent le même commencement et la même fin ; typiquement l'histoire des *jumeaux de Langevin* qui se séparent (commencement commun) puis se retrouvent (fin commune), après que l'un ait voyagé, mais pas l'autre. En physique newtonienne, les deux histoires auraient bien évidemment la même durée. L'hypothèse de l'existence du temps implique en effet que chacune des deux durées serait égale au laps de temps écoulé entre la fin et le début. Le calcul *non relativiste* montre en effet que les décalages cinématiques (négatifs) du voyage retour compensent ceux (positifs) du voyage aller.

Il n'en est rien dans l'espace-temps : les décalages cinématiques d'éloignement et ceux de rapprochement ne se compensent pas comme ils le feraient dans le cas newtonien ; les composantes linéaires (seules présentes, rappelons-le, dans le cas newtonien) se compensent bien ; mais pas les contributions non linéaires (qui marquent la différence avec la formule non relativiste), toujours positives à l'aller comme au retour.

Temps et vitesse du temps

Et le temps ? Comment définir une notion que l'on pourrait baptiser ainsi ? Il pourrait venir à l'esprit de choisir une collection d'horloges réparties en chaque point de la Terre (ou même de l'univers) : en supposant qu'elles aient été mises à zéro "ensemble" (après avoir défini ce que cela veut dire), la valeur du temps en un point serait *définie* comme l'indication de l'horloge résidant en ce point. C'est sans doute à une telle procédure qu'avait pensé Einstein avant de s'apercevoir que ces horloges seraient impossibles à conserver synchronisées⁴.

⁴ Au début du XX^e siècle, le mathématicien Hermann Weyl avait suggéré une proposition de ce genre pour définir le temps cosmique dans le cadre d'un modèle d'univers relativiste ; voir par exemple M. Lachièze-Rey, *L'Âge de l'Univers*, HumenSciences, 2021.

Une telle définition “naïve” ne pouvant opérer, c’est donc autrement que l’on doit “fabriquer” une grandeur que l’on va qualifier de “temps” ; ou plutôt de “temps-quelque chose” (temps universel, temps sidéral, temps cosmique, temps des éphémérides, temps atomique...) puisqu’une multitude d’options se présente et qu’il faudra préciser laquelle a été choisie. Précisons que, quelle que soit celle choisie, aucune horloge (sauf très rares exceptions) ne pourra être considérée comme indiquant (ou mesurant) ce temps⁵.

La fabrication d’un temps (je supprime désormais les guillemets) résulte du choix d’une horloge particulière, dans une localisation particulière ; dans la pratique plutôt un ensemble d’horloges bien choisies (selon l’usage auquel elles sont destinées) dont on moyennera les indications, mais je simplifierai le raisonnement en supposant, par exemple, un “temps parisien” t_p donné par l’unique horloge H_p de l’Observatoire de Paris.

Le “temps parisien” t_p , ainsi défini comme l’indication de l’horloge parisienne H_p , ne peut bien entendu être lu que sur place, par H_p . Aucune autre horloge (sauf coïncidence fortuite et passagère) n’indique sa valeur. En revanche il est parfaitement possible de transmettre l’indication de l’horloge H_p (par fibres optiques, ondes électromagnétiques...), à la manière de l’antique horloge parlante : sous forme de l’émission, par H_p , d’un bip chaque seconde de son temps propre parisien t_p .

Où que je sois (disons à Rome par exemple) je puis recevoir ces bips, et mesurer grâce à mon horloge la durée propre qui les sépare, soit $1+z$ seconde comme indiqué précédemment. Le décalage peut provenir de ma différence d’altitude avec Paris (dans le potentiel gravitationnel terrestre) ; ou de ma vitesse relative induite par la différence en longitude et latitude⁶. La durée de la “seconde de temps” transmise diffère ainsi de la seconde *physique*, celle que mesure une horloge⁷ ; si bien qu’il est commode de qualifier $1/(1+z)$ de “vitesse du temps” (du temps t_p que j’ai choisi) à la position où je le “mesure”⁸.

⁵ Précisons encore qu’il ne s’agit pas d’un simple retard ou avance, mais que deux horloges synchronisées à un instant (la mise à l’heure) ne le restent pas.

⁶ La rotation de la terre sur elle-même, et sa révolution autour du soleil, confèrent une vitesse relative à deux points de la surface terrestre qui diffèrent en latitude et en longitude. Un observateur à l’équateur se déplace par exemple avec une vitesse d’environ $10^{-6} c$ par rapport à un autre diamétralement opposé. La composante *linéaire* de leur décalage relatif est du même ordre, mais se compense avec le temps. La composante *non linéaire* en revanche, d’ordre 10^{-12} , engendre une désynchronisation qui s’accumule, incompatible avec la précision des horloges atomiques.

⁷ La rotation de la terre sur elle-même, et sa révolution autour du soleil, confèrent une vitesse relative à deux points de la surface terrestre qui diffèrent en latitude et en longitude. Un observateur à l’équateur se déplace par exemple avec une vitesse d’environ $10^{-6} c$ par rapport à un autre diamétralement opposé. La composante *linéaire* de leur décalage relatif est du même ordre, mais se compense avec le temps. La composante *non linéaire* en revanche, d’ordre 10^{-12} , engendre une désynchronisation qui s’accumule, incompatible avec la précision des horloges atomiques.

⁸ La rotation de la terre sur elle-même, et sa révolution autour du soleil, confèrent une vitesse relative à deux points de la surface terrestre qui diffèrent en latitude et en longitude. Un observateur à l’équateur se déplace par exemple avec une vitesse d’environ $10^{-6} c$ par rapport à un autre diamétralement opposé. La composante *linéaire* de leur décalage relatif est du même ordre, mais se compense avec le temps. La composante *non linéaire* en revanche, d’ordre 10^{-12} , engendre une désynchronisation qui s’accumule, incompatible avec la précision des horloges atomiques.

Ainsi mon horloge ne m'indique pas le temps t fabriqué, quel qu'il soit (sauf si j'occupe précisément la position de son horloge de définition) : elle m'indique une vraie grandeur physique, la durée propre de mon histoire, en conformité avec l'hypothèse des horloges. Et la réception des bips (venus de Paris) m'indique alors la *vitesse du temps* t (par exemple parisien) en ma position⁹. A la précision de la vie courante (inférieure à quelques millièmes), cette dernière est toujours suffisamment proche de l'unité pour que je puisse considérer que ma montre m'indique le temps t .

Avec la précision des horloges modernes (qui peut atteindre 10^{-18}) il n'en n'est rien : on doit sans arrêt corriger leur indication pour la ramener (à la précision requise) à celle du "temps t " (c'est l'objet de plusieurs autres communications de ce colloque). Mais on peut d'autre part s'intéresser plus précisément à cette vitesse du temps parfaitement mesurable aujourd'hui¹⁰. C'est elle qui rend nécessaires les corrections des horloges de référence pour la définition du temps, du temps universel par exemple¹¹. Mais sa mesure fournit des renseignements directement utilisables pour l'altimétrie ou la gravimétrie¹² : après avoir défini un temps, le protocole consiste à faire envoyer, par l'horloge de définition du temps, qui le mesure, un signal périodique. La mesure du décalage du signal reçu, par votre horloge, fournit la vitesse de ce temps là où vous êtes, dont vous pouvez déduire votre altitude ou les renseignements gravimétriques recherchés.

Je détaille maintenant quelques situations, terrestres ou astronomiques, où ces effets sont en cause ; pour plus de détails voir par exemple « Time and Durations in Relativistic Physics », ou *Gravitation*, déjà cités

Mesures sur Terre

Sur terre, les vitesses (toujours estimées en unités de c) dépassent rarement celle du son, soit environ 10^{-6} ; c'est aussi l'ordre de grandeur de la vitesse de révolution de la Terre à sa surface à l'équateur. On trouvera donc aisément des décalages de cet ordre, avec une composante quadratique de l'ordre de 10^{-12} ; en même temps, tous les points de la planète sont entraînés à 10^{-4} environ par le mouvement orbital autour du Soleil.

⁹ Si mes amis romains ont choisi de définir Réciproquement un « temps romain », mon horloge parisienne me permet de mesurer la vitesse de ce temps à Paris.

¹⁰ Elle est par exemple à l'œuvre dans le GPS ; voir par exemple Lachièze-Rey, M., « Time and Durations in Relativistic Physics », in *Time and Science Vol 3: Physical Sciences and Cosmology*, World Scientific 2023 (<https://doi.org/10.1142/q0405-vol3>).

¹¹ Le temps choisi t est en général défini à partir de plusieurs horloges « de base » et non pas d'une seule. Leurs désynchronisations mutuelles accumulées doivent être de temps en temps compensées, en ajoutant ou retranchant une seconde de manière adéquate.

¹² Voir plus bas ; et Lachièze-Rey, M., *Gravitation*, Flammarion, Paris 2024.

L'expérience Hafele-Keating : décalages et délais

Cette expérience, réalisée en 1971 par le physicien Joseph C. Hafele et l'astronome Richard E. Keating, reproduit pour la première fois la situation virtuelle des jumeaux de Langevin, remplacés par des horloges atomiques embarquées à bord d'avions de ligne (altitude 9km environ).

Une première horloge effectue un tour du monde en volant vers l'ouest. Sa vitesse de 830 km/h compense à peu près celle de la rotation terrestre, ce qui la rend proche du repos par rapport aux étoiles fixes. Une deuxième décrit un périple semblable vers l'est, ce qui lui confère deux fois la vitesse de rotation terrestre. Et la troisième demeure immobile par rapport à l'*Observatoire Naval des Etats-Unis*.

Les trois horloges sont parfaitement synchronisées à l'embarquement, qui constitue l'événement initial commun. Elles décrivent trois histoires différentes, et leur rassemblement constitue l'événement final commun F. Une fois réunies, les horloges apparaissent désynchronisées ; les délais observés, de l'ordre de la centaine de nanosecondes, correspondent parfaitement aux prédictions relativistes à la précision des mesures. La situation mélange effets cinématique et gravitationnel.

Une variante de l'expérience où les vitesses sont réduites a permis de se focaliser sur le délai gravitationnel qui apparaît voisin de 50 ns. L'envoi d'impulsions laser périodiques, ensuite reçues au sol après réflexion par les avions, a permis de tester les décalages pendant le vol, et de confirmer ainsi leur non-compensation à l'origine des délais¹³.

L'expérience de Pound et Rebka

La première mesure de décalage gravitationnel (alias effet Einstein) fut menée en 1959 à la tour de l'université de Harvard, par les physiciens américains Robert Vivian Pound (1919-2010) et son étudiant Glen Anderson Rebka, Jr (1931-2015). Ce *Harvard Tower Test*, considéré comme le troisième test classique de la relativité générale, exploite la différence de potentiel gravitationnel terrestre sur les 22.6 m qui séparent le récepteur (au sol) et le sommet de la tour.

La valeur mesurée du décalage (quelques 10^{-15}) fut bien conforme aux prévisions de la relativité générale. La précision fut améliorée en 1976 par l'expérience américaine *Gravity Probe A* (alias expérience de Vessot et Levine) ; puis encore davantage en 2014 par une fusée soviétique. Aujourd'hui, la précision des horloges atomiques (10^{-18} pour une horloge optique) permet de mesurer l'effet Einstein sur des différences d'altitude aussi faibles que le cm, avec une précision de 10^{-5} .

Il en résulte évidemment que deux horloges, même terrestres, ne peuvent rester synchronisées, en particulier si elles ne résident pas à la même altitude : le décalage atteint 3 microsecondes par an pour une différence d'altitude de 1km. Cette manifes-

¹³ Avec des vitesses (toujours en unités de c) de l'ordre de 10^{-6} , la composante quadratique est de l'ordre de 10^{-12} . Compte tenu de la durée des vols (une quarantaine d'heures), cela correspond bien aux valeurs mesurées.

tation directe de l'hypothèse des horloges interdit de soutenir l'idée que ces horloges mesureraient la même grandeur, un « temps » par exemple. On peut considérer décalages et délais gravitationnels comme des manifestations de la *vitesse du temps*.

Décalages et GPS

La manifestation la plus familière des ETRs est sans doute celle qui affecte le *Global Positioning System* (GPS) : les 24 satellites de la constellation NAVSTAR décrivent des orbites circulaires (période 12 h, altitude 20 200 kilomètres). Chacun emporte une horloge atomique au césium et envoie des signaux radio incorporant des informations concernant sa position.

Leurs vitesses ($1.3 \cdot 10^{-5} c$) leur confèrent des décalages cinématiques relativistes. La composante non linéaire, de l'ordre de $8.3 \cdot 10^{-11}$, se cumule à des délais de 7 microsecondes/jour. Cela se combine aux 45 microsecondes/jour de délai gravitationnel pour aboutir à 38 microsecondes/jour. Il en résulte que négliger la “vitesse du temps” (c'est-à-dire négliger les “effets relativistes”) conduirait à une erreur de positionnement voisine de 15 km/jour (une différence de 1 microseconde correspondant à 300m en position).

Décalages gravitationnels

En 2020, un groupe de l'Université de Tokyo a utilisé des horloges optiques connectées par fibres optiques pour mesurer le décalage gravitationnel $z \approx 5 \times 10^{-15}$ correspondant aux 450 m de la tour de Tokyo. Il s'agissait essentiellement de montrer la sensibilité, la précision et la robustesse de ces mesures.

Aujourd'hui, les mesures, de plus en plus précises, de ces ETRs commencent à être utilisées comme outils pratiques en altimétrie et en gravimétrie. Il s'agit de détecter des changements de courbure spatiotemporelle causés par la présence de masses enfouies, ou des activités volcaniques ou sismiques, avec la potentialité de prévoir de tous ces effets¹⁴. S'il se révèle trop compliqué de relier deux horloges par fibre optique on pourra le faire par l'intermédiaire de ACES (Atomic Clock Ensemble in Space). Ce projet de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) prévoit d'installer un ensemble d'horloges atomiques sur la Station Spatiale Internationale. La comparaison de leurs indications avec celles d'horloges au sol (“vitesse du temps”) fournira la différence entre les potentiels gravitationnels et permettre par exemple de déterminer le géoïde terrestre (géodésie relativiste) avec une sensibilité de quelques centimètres en altitude¹⁵.

¹⁴ Voir plus de détails sur *Gravitation*, op.cit. ; et aussi la prospective sur <http://arxiv.org/abs/2010.11156>.

¹⁵ https://www.researchgate.net/publication/340467276_Test_of_general_relativity_by_a_pair_of_transportable_optical_lattice_clocks.

Inutile sans doute de rappeler que les vitesses élevées des particules dans les accélérateurs et les rayons cosmiques engendrent des décalages cinématiques intenses. Cependant la composante relativiste, quadratique, reste en général masquée par la composante non relativiste.

Décalages gravitationnels astrophysiques

Naines blanches

En astrophysique, une première tentative de mesure de décalage gravitationnel eut lieu en 1925 : celle de Sirius B. Ce compagnon invisible de l'étoile Sirius fut reconnu en 1915 comme une naine blanche, étoile compacte et très peu brillante. Le signal se révéla inexploitable mais il fut mesuré plus tard par le *Hubble Space Telescope* (HST) à la valeur $z \approx 80 \text{ km/s}$ ¹⁶. D'autres décalages de naines blanches (du même ordre) furent mesurés par la suite.

Le décalage gravitationnel du Soleil

Einstein avait prévu dès 1908 que la différence de potentiel gravitationnel entre la surface du Soleil et celle de notre planète devait engendrer un décalage gravitationnel z de l'ordre de $2 \cdot 10^{-6}$. La confirmation la plus précise est récente et confirme la prédiction de la relativité générale avec une précision du pourcent¹⁷.

Autres objets compacts

Une étoile à neutrons, objet très compact, engendre donc un effet Einstein important. D'autre part un *pulsar*, étoile à neutrons en rotation très rapide, émet un rayonnement très régulier, ce qui lui confère les propriétés d'une excellente horloge naturelle. La situation est idéale pour mettre en évidence des ETRs.

Plusieurs décalages ont ainsi été mesurés depuis le début du siècle, avec des précisions diverses. Le cas d'un système binaire (un pulsar et un autre astre compact en orbite mutuelle) est exemplaire : le signal émis par le pulsar (qui se comporte ici exactement comme une horloge) passe à proximité de son compagnon compact avant de nous atteindre, et ressent la courbure spatiotemporelle qu'il engendre. Le délai dans l'arrivée du signal du pulsar peut atteindre la dizaine de microsecondes.

¹⁶ Adams, W.S., « *The Relativity Displacement of the Spectral Lines in the Companion of Sirius* », *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1925, 11, 382-387.

¹⁷ González Hernández, J. I., Rebolo, R., Pasquini, L., et al., « *The solar gravitational redshift from HARPS-LFC Moon spectra. A test of the General Theory of Relativity.* » *A&A*, 2020: arXiv_2009.10558.

Les résultats récents¹⁸ (détaillés dans *Gravitation*) représentent un bel exemple d'*astronomie gravitationnelle* où la pure gravitation (relativiste) fournit des renseignements sur le comportement de la matière.

TROU NOIR

Enfin, les manifestations les plus extrêmes de ces effets se rencontrent naturellement à proximité des trous noirs. Le prix Nobel de physique 2020 fut attribué pour les observations d'étoiles orbitant autour de *SagX**, le trou noir central de notre galaxie. Leurs vitesses atteignent des centièmes de c .

L'étoile So-2, l'une des plus proches du trou noir, subit une gravitation intense. Son observation à une centaine d'unités astronomiques de l'horizon du trou noir, avec une vitesse de $0.03\ c$, put mettre en évidence décalages cinématique non linéaire et composante gravitationnelle.

Le retard Shapiro

Je finirai en mentionnant un effet plus original de la courbure spatio-temporelle : le *retard Shapiro* (parfois qualifié de *quatrième test de la relativité générale*¹⁹) advient dans une situation de lentille gravitationnelle, lorsqu'un rayon lumineux émis par une source astronomique (une planète) se propage jusqu'à l'observateur terrestre en rasant un objet massif comme le Soleil. La courbure spatio-temporelle locale imprimée par ce dernier retarde l'arrivée du signal à l'observateur.

Un signal radar réfléchi par une planète et rasant le Soleil subit ainsi un retard d'environ 200 microsecondes (inexistant en physique newtonienne). L'effet fut confirmé dès les années 1960, puis sa précision améliorée quelques décennies plus tard grâce aux sondes Viking et Cassini²⁰.

Puisqu'il s'agit d'une déformation de l'espace-temps, l'effet Shapiro s'applique aussi aux neutrinos. C'est ainsi que, lors de l'explosion de la supernova SN1987A, l'arrivée simultanée des photons et des neutrinos émis a indiqué qu'ils avaient bien subi le même délai gravitationnel (estimé entre 1 et 6 mois), ce qui confirme le principe d'équivalence la relativité générale.

Il en est de même pour les ondes gravitationnelles. Celles de différences fréquences en provenance de la source GW150914 sont arrivées simultanément : elles

¹⁸ Measurement of Relativistic Orbital Decay in the PSR B1534+12 Binary System I. H. Stairs¹, Z. Arzoumanian, F. Camilo, A. G. Lyne, D. J. Nice¹, J. H. Taylor¹, S. E. Thorsett¹, A. Wolszczan <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9712296> ; RELATIVISTIC MEASUREMENTS FROM TIMING THE BINARY PULSAR PSR B1913+16, J. M. Weisberg et Y. Huang, 2016, *The Astrophysical Journal*, Volume 829, Number 1.

¹⁹ Irwin I. Shapiro 1964, « Fourth Test of General Relativity », *Physical Review Letters* 13, no 26: 789-91, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.789>.

²⁰ Bertotti, B., Iess, L., Tortora, P., « A test of general relativity using radio links with the Cassini spacecraft », *Nature*, Vol. 425, 2003, pp. 374-376.

ont subi le même délai Shapiro causé par la distribution de masse le long de la ligne de visée. Ces délais (autour de 1800 jours sur un trajet d'environ un milliard d'années) sont identiques à 0.2 seconde près ! Autre confirmation du principe d'équivalence.

Conclusion : Que faire du temps ?

Marc Lachièze-Rey

Tous ces effets soulignent l'originalité du monde réel, que décrivent parfaitement nos théories relativistes. Ils ne peuvent rester sans conséquences sur les interrogations méta physiques ou philosophiques à propos du temps, de la temporalité.

En manifestant l'impossibilité de synchroniser des horloges, les délais montrent très directement que ces dernières ne mesurent pas une grandeur commune, ce qui est pourtant la caractéristique du temps : n'est-il pas temps de bannir cette notion périmée dans la philosophie moderne de la nature ?

Il est certes important de débattre du *temps personnel* (physiologique, psychologique) de chacun. Mais ce dernier ne fait que manifester l'écoulement de la *durée propre* (malheureusement souvent baptisée *temps propre*), qui n'a de pertinence que pour le seul individu (ou objet) qu'elle concerne. Il est non moins important – et c'est en grande partie le sujet de ce colloque – de débattre des diverses propositions de “temps ceci ou cela” à finalité économique et sociale, telles celles discutées dans ce colloque.

Mais si l'on peut en définir arbitrairement autant que l'on veut, ce sont toujours des conventions qui n'ont pas vraiment de pertinence, voire de réalité, dans le monde physique. Aucun de ces “temps-quelque chose” ne sera *en réalité* mesurable par une horloge, même si l'on s'arrange pour que telle ou telle famille choisie d'horloges en donne une valeur approximative suffisante pour un usage prédéfini (social par exemple). Les vitesses de tous ces temps les uns par rapport aux autres sont en revanche mesurables, ce qui donne déjà lieu à de nombreuses applications pratiques.

Le physicien s'étonne de voir encore souvent débattre comme si l'on pouvait encore soutenir l'image d'un temps qui s'écoule dans le monde, un temps qui rythmerait les phénomènes qui nous entourent, un temps que mesureraient nos horloges. Il s'étonne de voir souvent encore discutés à ce propos des questions largement obsolètes. Même si l'“illusion du temps” fonctionne parfaitement dans la vie de tous les jours, elle est largement périmée pour les réflexions sur la constitution du monde réel, et il me semble que la réflexion philosophique devrait davantage en tenir compte.

Marc Lachièze-Rey

CNRS, Laboratoire Astroparticule et Cosmologie APC – Paris
mlr@apc.univ-paris7.fr

Pacôme Delva, Sébastien Bize

La réalisation des références spatio-temporelles

« Le temps est une invention du mouvement. Celui qui ne bouge pas ne voit pas le temps passer ».

Amélie Nothomb

« Le fil du temps est couvert de nœuds. Et la facile continuité des trajectoires a été ruinée complètement par la microphysique, le réel ne cesse de trembler autour de nos repères abstraits. Ce temps à petits quantas scintille ».

Gaston Bachelard

Introduction

Dans le cadre de la physique et pour la physique, nous cherchons à obtenir une représentation et une réalisation du temps aussi objectives que possible. Le principe élémentaire pour cela est l'identification, l'observation et la modélisation de phénomènes naturels qui semblent très périodiques, c'est-à-dire qui semblent se répéter de manière très régulière. L'observation continue d'un tel phénomène permet d'identifier une suite d'événements par rapport auxquels nous pouvons repérer ou dater d'autres observations. Par exemple, dans le cas d'un pendule, il est possible d'observer les passages successifs du pendule à la position verticale avec une vitesse positive et de situer un événement par rapport aux nombres de battements effectués par le pendule au moment où cet événement a lieu.

Il existe dans le cadre de la physique au moins quatre conceptions majeures du temps qui sont liées à différentes théories. D'abord le temps comme mouvement. Selon Aristote, le temps est le nombre du mouvement selon l'avant et l'après. On peut ainsi mesurer une durée, l'intervalle de temps entre deux événements, grâce au mouvement de l'eau ou du sable dans une clepsydre ou un sablier. Fabriquer une échelle de temps nécessite cependant de pouvoir reproduire à l'identique la même durée grâce à l'identification d'un phénomène périodique. Pendant très longtemps, le phénomène de référence a été la rotation de la Terre sur elle-même observée de manière de plus en plus raffinée, par rapport au Soleil puis par rapport à des étoiles lointaines. Dans le cas de la rotation de la Terre observée par rapport

au Soleil, les événements observés sont par exemple les passages du Soleil au méridien, que l'on peut repérer grâce à un cadran solaire. Les astronomes observent aujourd'hui la rotation de la Terre par rapport à des galaxies très lointaines appelées quasars, dont le mouvement propre apparent est presque nul, grâce à un ensemble de radiotélescopes répartis sur Terre.

La deuxième conception du temps est arrivée avec la mathématisation de la physique : le temps comme paramètre d'évolution d'une équation dynamique. Le mouvement est alors décrit par des équations dynamiques dans lesquelles apparaissent des variables dynamiques. Dans le cas du pendule, l'angle du mobile par rapport à la verticale est une fonction du temps. Le temps apparaît comme un paramètre d'évolution de l'équation. Dans le cas d'un phénomène périodique apparaît alors dans les équations un temps caractéristique, appelé la période, au bout duquel le phénomène se reproduit à l'identique. En comptant le nombre de périodes de manière ininterrompue nous avons créé une horloge. Une horloge est d'autant plus exacte que le modèle physico-mathématique décrit bien les mesures, et d'autant plus stable que chaque période se reproduit bien à l'identique.

Au ^{XX}^{ème} siècle, la physique est bouleversée par deux grandes théories : la physique quantique et la relativité générale, qui ont accompagné l'établissement des références spatio-temporelles modernes, objets de cet article. Ainsi, la troisième grande conception du temps de la physique est le temps comme quantum d'énergie. En effet, la physique quantique introduit une nouvelle constante fondamentale : la constante de Planck. Celle-ci relie une différence d'énergie à une fréquence, qui est l'inverse d'un temps. Or, les niveaux d'énergie d'un atome sont quantifiés : à chaque différence de niveau, ou transition, correspond un temps caractéristique (voir Section 1).

Cette révolution de la physique quantique signe l'avènement du temps atomique, qui commence en 1955 avec l'étalon de fréquence au césium construit par Essen et Parry au National Physical Laboratory (NPL)¹. Depuis lors, l'exactitude et la stabilité des horloges atomiques n'ont cessé de s'améliorer, avec un gain d'environ un ordre de grandeur tous les dix ans (voir Figure 1). Dans la décennie 1930, les progrès des observations de la rotation de Terre ainsi que l'apparition des premières horloges à quartz ont permis à Nicolas Stoyko et d'autres collègues astronomes de révéler les irrégularités du mouvement de la Terre, et en particulier des variations non prédictibles de la durée du jour de l'ordre de la milliseconde², ce qui a conduit à baser la définition de l'unité de temps sur une transition atomique. Dans ce contexte, l'unité de temps du Système international d'unités (SI), la seconde, a été officiellement définie par rapport à une transition hyperfine spécifique de l'atome de césium en 1967-1968³.

¹ Voir Ramsey, F.R., « History of Early Atomic Clocks », *Metrologia*, Vol. 42, n°3, 2005 ; Leschiutta, S., « The Definition of the 'Atomic' Second », *Metrologia*, Vol. 42, n°3, 2005.

² Stoyko, A., Stoyko, N., « Les fluctuations périodiques de la rotation de la terre pendant les années 1933-1940. Conclusions pour la période 1933-1954 », *Bulletins de l'Académie Royale de Belgique*, Vol. 42, 1956, pp. 693-702.

³ Résolution 1 de la 13^{ème} Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM). Voir à ce propos Terrien, J., « News from the International Bureau of Weights and Measures », *Metrologia*, Vol. 3, n°1, 1967.

De plus, alors que des échelles de temps atomiques locales étaient développées grâce à des horloges à césium commerciales⁴ ainsi qu'à des étalons à césium de laboratoire, il était nécessaire de comparer ces différentes échelles de temps afin de construire un temps atomique international moyen, qui pourrait être adopté par tout le monde. C'est ce qu'ont fait au début l'Observatoire naval des États-Unis (USNO) et le Bureau international de l'heure (BIH) avec des signaux horaires radio⁵, qui ont permis des comparaisons de temps avec des incertitudes⁶ de l'ordre de 1 ms. La première démonstration par la société Hewlett-Packard de la possibilité d'utiliser des vols commerciaux pour transporter ses horloges à césium a permis d'améliorer la précision, avec une incertitude d'environ 1 μ s. Aujourd'hui, les meilleures méthodes de transfert de temps par satellites atteignent des instabilités de l'ordre de 100 ps au-delà d'un jour⁷, alors que les méthodes de transfert de temps optique au sol atteignent des instabilités inférieures à la femtoseconde⁸.

De plus, maintenant que les incertitudes des meilleures horloges atomiques atteignent 10^{-18} en fréquence relative (voir Figure 1), et qu'elles peuvent être comparées à ce niveau sur des distances continentales avec des fibres optiques, les modèles et les théories physiques utilisés pour les décrire doivent inclure tous les effets physiques avec au moins le même niveau d'incertitude. Nous verrons dans la Section 1 les principes physiques de fonctionnement des références atomiques de fréquence utilisées pour fabriquer les échelles de temps locales.

Cependant, nous verrons dans les Sections 2 à 5 que la notion de temps classique se trouve bouleversée par la théorie de la relativité, ce qui nous mène à la quatrième grande conception du temps de la physique : le temps comme convention géométrique. La solution de l'équation d'Einstein est la métrique de l'espace-temps à quatre dimensions. La métrique est un concept très général qui permet aux géomètres de mesurer une distance dans l'espace, ou bien aux géographes de mesurer une distance sur la surface courbe de la Terre. Elle définit les "distances" dans l'espace-temps à quatre dimensions. Le temps, une des quatre coordonnées de l'espace-temps, est défini implicitement par la donnée de la métrique. Le temps devient alors une façon conventionnelle, non physique, de découper l'espace-temps en tranches. Il y a une infinité de possibilité de le faire, car on peut représenter exactement la même géométrie de l'espace-temps mais avec une infinité de sys-

⁴ Cutler, L.S., « Fifty Years of Commercial Caesium Clocks », *Metrologia*, Vol. 42, n°3, 2005.

⁵ Pour une histoire des horloges atomiques voir Guinot, B., Arias, E.F., « Atomic Time-Keeping from 1955 to the Present », *Metrologia*, Vol. 42, n°3, 2005.

⁶ L'incertitude est une notion clé de la métrologie, et son expression fait l'objet d'un guide de 132 pages édité par le JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology). En bref, l'incertitude quantifie le doute sur la validité du résultat de la mesure d'une grandeur physique. Voir Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML), *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, 2008.

⁷ Parker, T.E., et al., « A Three-Cornered Hat Analysis of Instabilities in Two-Way and GPS Carrier Phase Time Transfer Systems », *Metrologia*, Vol. 59, n°3, 2022.

⁸ Caldwell, E.D., et al., « Quantum-Limited Optical Time Transfer for Future Geosynchronous Links », *Nature*, n°618, 2023, pp. 721-726.

tèmes de coordonnées. Le temps est alors un temps mathématique qui doit être calculé à partir des observations.

Aujourd'hui, le temps que nous avons sur nos montres et nos téléphones est une combinaison du temps comme quantum d'énergie et comme convention géométrique. Nous décrirons dans la Section 5 les principales échelles de temps et références spatio-temporelles utilisées et définies dans les conventions internationales. Pour finir, dans la Section 6, nous décrirons la métrologie comme démarche heuristique au travers de deux exemples : l'expérience historique du pendule des astronomes et son pendant moderne avec des horloges atomiques.

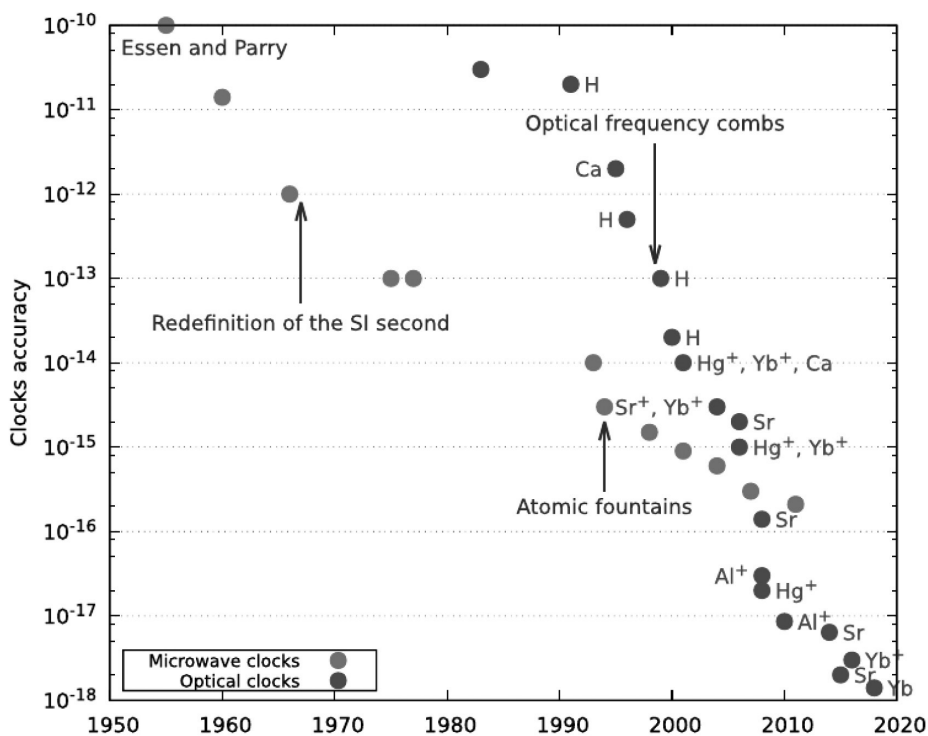


Figure 1 : Exactitudes des horloges à micro-ondes et des horloges optiques. Depuis la première horloge à césium d'Essen et Parry dans les années 1950, un ordre de grandeur a été gagné tous les dix ans. L'avènement des peignes de fréquence optiques a largement amélioré les performances des horloges optiques, qui ont récemment dépassé les horloges à micro-ondes.

L'objet de cet article, la construction et la matérialisation des références spatio-temporelles, s'inscrit très bien dans une vision bachelardienne dans laquelle le phénomène physique n'est jamais simplement reçu ou observé, mais construit rationnellement au

travers du langage mathématique. Nous verrons que cela est vrai aussi bien pour la physique quantique, au travers de l'algèbre linéaire, que pour la relativité générale, au travers du calcul tensoriel. D'après Dennet, la position du philosophe raisonnable peut être « d'étudier, dans son fauteuil, les meilleurs fruits du laboratoire, les meilleurs apports de théoriciens ancrés dans la réalité et de procéder alors avec sa philosophie propre en essayant d'éclairer les obstacles conceptuels et même d'aboutir dans un certain domaine, de temps en temps, cela ayant l'intérêt d'éclaircir d'une manière ou d'une autre les implications de quelque idée théorique particulière »⁹. Cette position nous paraît bien décrire celle de Bachelard, que nous citerons afin d'éclairer d'un jour nouveau les notions et concepts abordés dans cet article.

Nous devons prévenir que nous sommes physiciens de formation et non philosophes ; mais « les scientifiques passent aussi un peu de temps dans leur fauteuil, en essayant d'éclaircir la manière d'interpréter les expériences de chacun et ce qu'ils font en ces moments-là se mêle imperceptiblement à ce que font les philosophes. Affaire risquée mais stimulante »¹⁰. Nous prenons le risque...

1 – Les références atomiques de fréquence

Les atomes ont des niveaux d'énergie discrets qui sont très bien décrits dans le cadre théorique du modèle standard de la physique des particules fondé sur la mécanique quantique. Dans ce cadre, à chaque différence d'énergie ($E_e - E_f$) entre deux niveaux atomiques e et f correspond une fréquence ν_{ef} via la relation de Planck $E_e - E_f = h \nu_{ef}$, où h est la constante de Planck. Cette fréquence est la fréquence d'oscillation de certaines observables atomiques lorsque l'atome se trouve dans une superposition quantique des deux états e et f . C'est également la fréquence nominale qu'une onde électromagnétique doit avoir pour induire une transition de l'atome de l'état f à l'état e .

Les étalons atomiques de fréquence sont des systèmes expérimentaux permettant d'accéder à la fréquence caractéristique ν_{ef} d'une transition atomique choisie. Dans la configuration la plus fréquente d'un tel dispositif, on utilise une source de champ électromagnétique que l'on fait interagir avec les atomes de manière à induire la transition de f vers e et on mesure, de manière répétitive, la fraction d'atomes qui ont effectué la transition, passant de f à e . Grâce à ce processus d'interrogation, nous pouvons accorder la fréquence de la source de manière à rendre et à maintenir maximale cette efficacité de transition et ainsi faire coïncider la fréquence de la source avec celle de l'atome ν_{ef} . Ceci fait, nous disposons d'un signal électromagnétique macroscopique, c'est-à-dire suffisamment puissant pour être utilisé, et qui reproduit la fréquence atomique et donc, dans une certaine mesure, sa propriété d'être parfaitement stable et universelle.

⁹ Dennett, D., « Consciousness Explained », London, Penguin Books, 1991, cité et traduit par Chazal, G., « Bachelard et la relativité », *Cahiers Gaston Bachelard*, Vol. 12, n°1, 2012, pp. 37-48, p. 47.

¹⁰ *Ibidem*, p. 48.

Ce système expérimental illustre bien comment la mathématique, et en particulier l'algèbre linéaire au travers de la théorie de la mécanique quantique, devient une méthode plutôt qu'un langage, et provoque les conditions instrumentales qui permettent la systématisation de l'essence du réel¹¹. La phénoménologie, ou phénoménographie, encore possible lorsque l'on observait les passages successifs du Soleil au méridien, devient phénoménotechnique : « la physique mathématique correspond alors à une nouménologie très différente de la phénoménographie dans laquelle l'empirisme scientifique prétend se cantonner. Cette nouménologie explique une phénoménotechnique par laquelle les phénomènes nouveaux sont, non pas simplement trouvés, mais inventés, construits de fond en comble »¹².

Ainsi, le réductionnisme méthodologique de la science fait dépendre la connaissance et la construction du temps physique de la réalisation d'un étalon atomique de fréquence dans un système expérimental complexe. Bachelard déclare que les « instruments ne sont que des théories matérialisées »¹³. Une horloge atomique peut être vue comme une matérialisation de la mécanique quantique, produisant ainsi le temps comme quantum d'énergie, qui devient une « réalité construite ».

Un aspect important de la recherche sur les étalons atomiques de fréquence vise à comprendre et à maîtriser les phénomènes physiques qui perturbent le processus d'interrogation, ayant pour effet que le signal fourni par un étalon atomique ne coïncide pas parfaitement avec la fréquence ν_{ef} . Les perturbations sont diverses et nombreuses, certaines de nature fondamentale et universelle, d'autres de nature spécifique à la configuration de l'horloge, d'autres encore de nature plus technique. On retrouve ici l'idée de Bachelard que la phénoménotechnique « doit reconstituer de toutes pièces ses phénomènes sur le plan retrouvé par l'esprit en écartant les parasites, les perturbations, les mélanges, les impuretés qui foisonnent dans les phénomènes bruts et désordonnés »¹⁴. Ainsi : « comme l'esprit ne tire plus l'abstrait du concret, comme l'esprit est, au contraire, habilité à former directement l'abstrait, il est tout naturellement amené à proposer cet abstrait rationnel à l'expérience, bref, à produire l'expérience sur des thèmes abstraits nouveaux »¹⁵. Ce thème nouveau est ici l'algèbre linéaire appliqué à la quantification des niveaux d'énergie des atomes, abstraction qui a permis la rationalisation du temps quantique.

En quelque sorte, la métrologie est la science qui a poussé le plus loin la formalisation d'une phénoménotechnique. Le Comité mixte pour les guides de métrologie (JCGM) explicite la relation entre la valeur « vraie » et la valeur corrigée :

¹¹ Castelão Lawless, T., « La création et le développement de la phénoménotechnique dans l'œuvre de Gaston Bachelard », *Cahiers Gaston Bachelard*, Vol. 1, n°1, 1998, pp. 49-57.

¹² Bachelard, G., « Noumène et microphysique », *Recherches philosophiques*, n. 1, 1931, pp. 55-65, in Id., *Études*, Paris, Vrin, 1970, pp. 11-24.

¹³ Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, Félix Alcan, 1934.

¹⁴ Bachelard, G., *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine*, Paris, Félix Alcan, 1937.

¹⁵ *Ibidem*.

Le résultat du mesurage de la grandeur réalisée est corrigé de la différence entre cette grandeur et le mesurande, pour ramener le résultat de mesure à ce qu'il aurait été si la grandeur réalisée avait en fait satisfait complètement à la définition du mesurande. Le résultat du mesurage de la grandeur réalisée est aussi corrigé de tous les autres effets systématiques reconnus comme significatifs. Bien que le résultat final corrigé soit parfois considéré comme la meilleure estimation de la valeur "vraie" du mesurande, le résultat est en réalité simplement la meilleure estimation de la valeur de la grandeur que l'on veut mesurer.¹⁶

Le mesurande en métrologie doit être spécifié par la description d'une grandeur spécifique, et l'objectif du mesurage consiste à en déterminer la valeur. Un mesurage commence par une définition appropriée du mesurande, de la méthode de mesure et de la procédure de mesure. Cependant, le mesurande, et a fortiori le mesurage, ne pourraient être complètement décrits qu'avec une quantité infinie d'information. Ainsi, les lacunes de la définition du mesurande introduisent une composante d'incertitude du résultat d'un mesurage qui se répercute sur l'estimation de la grandeur en question. Une valeur est "vraie" dans les limites de la définition imparfaite du mesurande. La matérialisation de la théorie dépend ainsi de la définition théorique de la grandeur que l'on veut réaliser, et des descriptions plus ou moins complètes des méthodes et procédures de mesures. Pour l'exprimer comme Bachelard, les techniques, les mesures et les calculs se coordonnent pour donner un véritable rationalisme du temps quantique¹⁷. Le travail du métrologue est de s'assurer qu'entre lui et la grandeur qu'il mesure, tout est correctement rectifié, ce qui est généralement résumé dans le bilan d'incertitude du système expérimental.

Parmi les phénomènes universels qui perturbent le système expérimental de l'horloge atomique, il y a l'effet du rayonnement thermique, nominalement décrit par la loi de Planck, auquel les atomes sont inévitablement exposés. Il y a aussi le bruit quantique qui intervient lorsque l'état atomique est détecté. Les effets du mouvement des atomes sont aussi universellement présents. Mais nous pouvons signaler que leur manifestation et leur prégnance dépendent fortement de la configuration de l'interrogation, en particulier de l'utilisation ou non d'atomes piégés. Les interactions entre les atomes de l'échantillon et les gaz résiduels environnants produisent elles aussi des perturbations de l'interrogation. Lorsque l'échantillon atomique n'est pas réduit à un seul atome, les interactions entre atomes interviennent aussi. Parmi les phénomènes plus spécifiques ou techniques, on peut mentionner l'effet des fluctuations de la fréquence de la source d'interrogation et les effets du piégeage ou d'autres champs (magnétiques notamment) appliqués de manière intentionnelle.

Dans les étalons atomiques, nous arrivons à connaître et à maîtriser les perturbations de façon à rectifier le signal électromagnétique pour que sa fréquence

¹⁶ Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, cit.

¹⁷ Une phrase inspirée de la citation : « Ainsi les techniques, les mesures et les calculs se coordonnent pour donner un véritable rationalisme de l'électron », dans Bachelard, G., *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1951.

coïncide très bien avec la fréquence atomique non perturbée et que le degré de non-coïncidence soit caractérisé par une incertitude. À partir de ce signal, on peut observer une suite continue d'événements, par exemple la succession des passages par zéro du champ électrique de l'onde avec une variation positive dans une direction choisie, par rapport à laquelle on peut repérer ou dater toute autre observation. Le comptage d'un nombre successif choisi d'événements permet de réaliser un intervalle de temps. Ainsi, « le principe des fréquences domine le principe des mesures. Autrement dit, la question "combien de fois ?" prime la question "combien de temps ?" »¹⁸. Alors que le temps selon Aristote est lié au mouvement, il n'en est rien avec la conception du temps quantique qui peut être lié à la vibration, comme l'exprime bien Bachelard :

Si un corpuscule cessait de vibrer, il cesserait d'être. Désormais, il est impossible de concevoir *l'existence* d'un élément de matière sans adjoindre à cet élément une fréquence déterminée. On peut donc dire que l'énergie vibratoire est *l'énergie d'existence*. Pourquoi alors n'aurions-nous pas le droit d'inscrire la vibration sur le plan même du temps primitif ? Nous n'hésitons pas. Pour nous, le temps primitif est le temps vibré. La matière existe dans un temps vibré et seulement dans un temps vibré. Au repos même, elle a de l'énergie parce qu'elle repose sur le temps vibré.¹⁹

Les principes généraux que nous venons de décrire s'appliquent à tous types de transition électronique entre niveaux d'énergie et de systèmes atomiques possibles. Toutefois, seules quelques transitions particulières permettent de réaliser de bons étalons de fréquence. Par exemple, les étalons à atomes refroidis par laser utilisant la transition hyperfine du césium 133, qui est dans le domaine micro-onde réalisent cette transition avec une incertitude relative proche de 10^{-16} , soit 1 sur 10 million de milliards. Des étalons utilisant des transitions dans le domaine optique, par exemple dans l'atome strontium 87 ou dans l'ion aluminium (27Al^+) atteignent des incertitudes encore 100 fois meilleures : 10^{-18} .

Des étalons atomiques de fréquences fondés sur des transitions atomiques différentes produisent des suites d'événements à des rythmes différents. Pour définir une unité de temps commune, il est donc nécessaire de faire un choix conventionnel particulier. Le choix en vigueur depuis 1967 consiste à choisir une et une seule transition atomique, la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133, et à choisir une valeur conventionnelle pour sa fréquence : 9192 631770 Hz.

Ce choix signifie que l'observation de 9192 631770 oscillations successives d'une onde électromagnétique accordée sur la transition hyperfine du césium 133 réalise une seconde. Notons dès maintenant que, dans le cadre de l'espace-temps décrit par la relativité générale, il s'agit d'une seconde de temps propre de l'horloge utilisée pour obtenir cette onde.

De plus, nous verrons en conclusion de cet article que ce choix conventionnel est remis en question : face à la multiplicité et à la plus grande précision des étalons de fréquence optiques par rapport aux fontaines atomiques (à césium), il est envi-

¹⁸ Bachelard, G., *La dialectique de la durée*, Paris, PUF, 1950.

¹⁹ *Ibidem*.

sagé de redéfinir la seconde à l'aide de nouvelles fréquences. Cette quête métrologique de la précision est souvent justifiée par des notions telles que la serendipité et l'utilité économique, ou encore par le fonctionnement propre aux technosciences : « Une bonne partie des recherches menées aujourd'hui ne le sont que parce qu'il y a des instruments pour le permettre »²⁰. Cependant, la métaphore de Bachelard peut nous apporter un éclairage différent :

Dans l'orchestre du Monde, il y a des instruments qui se taisent souvent, mais il est faux de dire qu'il y a toujours un instrument qui joue. Le Monde est réglé sur une mesure musicale imposée par la cadence des instants. Si nous pouvions entendre tous les instants de la réalité, nous comprendrions que ce n'est pas la croche qui est faite avec des morceaux de blanche, mais bien la blanche qui *répète* la croche. C'est de cette répétition que naît l'impression de continuité. Dès lors, on comprend que la richesse relative en instants nous prépare une sorte de mesure relative du temps. Pour pouvoir faire le compte exact de notre fortune temporelle, mesurer en somme tout ce qui se répète en nous-mêmes, il faudrait vraiment vivre tous les instants du Temps. C'est dans cette totalité qu'on obtiendrait le véritable déploiement du temps discontinu, et c'est dans la monotonie de la répétition qu'on retrouverait l'impression de la durée vide et par conséquent pure. Fondé sur une comparaison numérique avec la totalité des instants, le concept de richesse temporelle d'une vie ou d'un phénomène particulier prendrait alors un sens absolu, d'après la manière dont cette richesse est utilisée, ou plutôt d'après la manière où elle manque sa réalisation. Mais cette base absolue nous est refusée, nous devons nous contenter de bilans relatifs.²¹

Ainsi, cette quête métrologique de la précision du temps quantique serait une quête de la totalité, base absolue à l'aune de laquelle prendrait sens le concept de richesse temporelle d'une vie ou d'un phénomène particulier. Cela est bien exprimé dans la conclusion de l'article « La démesure de la précision » : « Le passé l'a montré, l'avenir le confirmera : les mesures de très haute précision conduisent indéniablement à des révolutions scientifiques et à des ruptures technologiques importantes pour notre société »²².

2 – Structure de l'espace-temps

En 1905, Albert Einstein a publié les principes fondamentaux de la relativité restreinte après avoir réfléchi attentivement aux problèmes liés à la synchronisation d'horloges éloignées. Cela a marqué la première étape vers sa théorie de la relativité générale complétée en 1916. Dans cet article fondateur intitulé « Zur Elektrodynamik bewegter Körper » et paru dans les *Annalen der Physik*, Einstein présente sa nouvelle perspective sur la notion de temps. Il suggère que toutes les difficultés

²⁰ Lévy-Leblond, J.-M., « L'avenir de la science, l'avenir d'une illusion ? », in *La science en question(s)*, Auxerre : Éditions Sciences Humaines, 2014, pp. 289-300.

²¹ Bachelard, G., *L'intuition de l'instant*, Paris, Gonthier, 1932.

²² Dimarcq, N., Sagnes, I., « La démesure de la précision », CNRS Le Journal, <https://lejournal.cnrs.fr/billets/la-demesure-de-la-precision> (dernière consultation 17.08.2024).

liées à la définition du temps peuvent être surmontées en remplaçant la notion de temps par « la position de la petite aiguille de ma montre ». Cette illustration met en évidence le concept fondamental du temps propre, tout en soulignant que le temps n'est plus considéré comme une quantité absolue indépendante du référentiel choisi, mais plutôt comme le résultat d'une expérience liée au référentiel de l'observateur.

Le développement de la relativité einsteinienne correspond pour Bachelard à une véritable rupture épistémologique : « Il n'y a donc pas de transition entre le système de Newton et le système d'Einstein. On ne va pas du premier au second en amassant des connaissances, en redoublant de soins dans les mesures, en rectifiant légèrement des principes. Il faut au contraire un effort de nouveauté totale »²³. Cet effort de nouveauté contraint le physicien « à une remise en question et en doute de ce qui paraissait évident jusque-là, de concepts qui demeuraient non interrogés, et principalement celui de simultanéité »²⁴, comme nous le verrons dans la section suivante. Voyons maintenant quelques conséquences contre-intuitives de la théorie de la relativité concernant le temps et l'espace.

Lorsqu'un événement se produit, tel qu'une collision d'objets, un flash ou une mesure particulière, l'expérimentateur associe une valeur temporelle et une position dans l'espace. Selon la théorie de la relativité, ces concepts sont si étroitement liés qu'ils peuvent se mélanger de différentes manières en fonction de la vitesse de l'expérimentateur (ou de son référentiel) par rapport à l'événement. Par conséquent, un expérimentateur peut mesurer des temps et des positions différents de ceux obtenus par un autre expérimentateur ayant une vitesse différente.

Dans un monde aussi "subjectif", comment peut-on pratiquer la physique ? Selon la citation d'Einstein, la clé réside dans la mise en place d'une expérience précise pour obtenir une réponse. Prenons une particule ponctuelle en mouvement. Peu importe la manière dont nous l'observons, elle suit une trajectoire dans l'espace-temps, ce qui a une réalité physique indéniable. Les relativistes appellent cette trajectoire une "ligne d'univers". Si nous attachons une horloge à la particule, elle mesurera le temps qu'il lui faut pour parcourir sa ligne d'univers, ce que nous appelons son "temps propre". Ainsi, cette horloge définit une chronologie basée sur le principe de causalité appliqué à la particule. Étant donné que l'espace et le temps sont sujets à interprétation, ce temps propre devient une mesure directe de la "longueur" de la ligne d'univers de la particule dans l'espace-temps. Cette mesure possède également une réalité intrinsèque. Raisonner globalement dans l'espace-temps nous permet de trouver des éléments physiques indépendants de l'état de l'expérimentateur qui les observe. L'observateur se contente de projeter la ligne d'univers et le temps propre associé dans les coordonnées définies par son référentiel, c'est-à-dire qu'il interprète leurs caractéristiques en termes d'espace et de temps selon son protocole d'observation.

Conséquence directe de cette approche, il en découle qu'il n'existe plus de chronologie a priori sur laquelle tous les expérimentateurs ou observateurs peuvent être d'accord. Les phénomènes décrits dans les ouvrages sur la relativité (tels que

²³ Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, cit.

²⁴ Chazal, G., « Bachelard et la relativité », cit., p. 43.

la dilatation temporelle, la contraction des longueurs, etc., lors de changements de référentiel) sont une résultante de cette perspective. Selon la vitesse de l'expérimentateur, il est effectivement possible d'observer des phénomènes qui vont à l'encontre du bon sens commun de la physique newtonienne, tels que des événements sans lien causal se produisant dans un ordre temporel inversé, une apparence modifiée des objets, des mesures d'angles altérées, l'effet Doppler transverse, et bien d'autres encore²⁵.

Autre conséquence de la théorie de la relativité, le temps et l'espace sont liés dans les équations relativistes par une constante, généralement appelée "c", qui permet de "convertir" le temps en espace. Cette constante est caractéristique de la structure profonde de l'espace-temps. Le principe de relativité appliqué à l'électromagnétisme conduit à ce que "c" soit identifié à la vitesse de la lumière dans le vide, résultant de l'équivalence entre temps et espace plutôt que d'un privilège accordé à la lumière. Einstein a initialement posé la constance de la vitesse de la lumière comme un postulat dans sa théorie de la relativité restreinte, mais dès 1910, les chercheurs ont montré qu'une approche géométrique pouvait remplacer ce postulat en postulant une structure de l'espace-temps respectant le principe de causalité²⁶. Cela implique une limite de vitesse pour les particules sans masse, telles que les photons : la vitesse "c". Ces particules ont une trajectoire dans l'espace-temps que l'on appelle courbe de type lumière.

L'ensemble des courbes de type lumière qui se croise en un événement forment deux cônes de lumière : un cône de lumière future et un cône de lumière passé. L'espace-temps est alors divisé en différents domaines, contenant d'un côté (à l'extérieur des cônes) les courbes de type espace et de l'autre côté (à l'intérieur des cônes) les courbes de type temps. Cela a conduit Einstein et d'autres à sa suite à considérer que l'espace-temps est un univers bloc²⁷, c'est-à-dire que « tous les moments du temps coexistent, et que la succession constitue une illusion ». Cependant, cette conception se heurte à un ensemble d'objections fondées sur la conception du temps psychologique, développé par deux interlocuteurs d'Einstein, Henri Bergson et Karl Popper²⁸.

3 – Relativité restreinte et simultanéité

Nous avons vu que la théorie de la relativité est née d'une réflexion sur la synchronisation d'horloges éloignées, et donc sur le concept de simultanéité. D'après Bachelard :

²⁵ Voir Lachize – Rey, M., *infra*.

²⁶ Pour une revue voir Baccetti, V., et al., « Inertial Frames without the Relativity Principle », *Journal of High Energy Physics*, Vol. 2012, n°5, 2012, p. 119.

²⁷ Voir Einstein, A., *Relativity: The Special and General Theory*, eng. tr. by R.W. Lawson, London, Methuen, 1920, (*Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Braunschweig, Vieweg, 1917).

²⁸ Pour une revue de l'histoire du concept de l'univers-bloc voir Dolbeault, J., « Einstein et l'univers-bloc », *Revue d'histoire des sciences*, n°71.1, 2018, pp. 79-109.

Par une exigence subite, le physicien contemporain nous demandera d'associer à l'idée pure de simultanéité l'expérience qui doit prouver la simultanéité de deux événements. C'est de cette exigence inouïe qu'est née la Relativité. Le Relativiste nous provoque : comment vous servez-vous de votre idée simple ? Comment prouvez-vous la simultanéité ? Comment la connaissez-vous ? Comment vous proposez-vous de nous la faire connaître, à nous qui n'appartenons pas à votre système de référence ? Bref, comment faites-vous fonctionner votre concept ? Dans quels jugements expérimentaux l'impliquez-vous, car l'implication des concepts dans le jugement, n'est-ce point là le sens même de l'expérience ? Et quand nous avons répondu, quand nous avons imaginé un système de signaux optiques pour que des observateurs différents puissent convenir d'une simultanéité, le Relativiste nous contraint à incorporer notre expérience dans notre conceptualisation. Il nous rappelle que notre conceptualisation est une expérience. Le monde est alors moins notre représentation que notre vérification.²⁹

Dans la théorie de la relativité restreinte, il est possible de définir un temps qui s'écoule de la même manière pour tous les observateurs dans un référentiel donné. Cependant, si le temps peut s'écouler différemment en changeant de référentiel, cela implique l'utilisation d'un outil géométrique approprié pour calculer les temps et les distances. Cet outil, issu du calcul tensoriel, est appelé la métrique de l'espace-temps. La métrique permet de calculer le temps qui s'écoule le long de la ligne d'univers d'un observateur, ou encore de calculer la "distance" entre deux événements quelconques de l'espace-temps.

Dans le cas d'un espace euclidien à trois dimensions, la métrique permet de calculer les distances classiques entre deux points de l'espace. Dans ce cas, les distances entre deux points sont toujours positives, et un espace vectoriel peut être associé, dans lequel tous les vecteurs ont une norme positive. Cependant, l'espace-temps de la relativité restreinte ne peut pas simplement être une généralisation de l'espace euclidien en quatre dimensions en raison des propriétés énoncées précédemment. Il est nécessaire de modifier la nature même de la métrique pour introduire une nouvelle phénoménologie. La métrique de la relativité restreinte est appelée métrique minkowskienne ou pseudo-euclidienne. La "distance" entre deux événements de l'espace-temps n'est plus nécessairement positive comme dans l'espace euclidien : elle peut être nulle ou même négative, tout comme les "normes" des vecteurs ! Dans cet espace-temps, la courbe de type lumière a une "longueur" nulle, alors que la courbe de type espace entre deux événements qui ne peuvent pas être reliés causalement, a une "distance" négative.

On retrouve ici, au travers du tenseur métrique, l'idée de Bachelard que c'est la théorie, la mathématique, qui va nous permettre de penser les phénomènes. Ainsi : « Le Calcul Tensoriel est vraiment le cadre psychologique de la pensée relativiste. C'est un instrument mathématique qui crée la science physique contemporaine comme le microscope crée la microbiologie. Pas de connaissances nouvelles sans la maîtrise de cet instrument mathématique nouveau »³⁰.

²⁹ Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, cit.

³⁰ *Ibidem*.

Comment peut-on définir grâce au tenseur métrique un événement simultané dans deux référentiels où le temps s'écoule différemment en raison de leurs vitesses différentes ? Il est essentiel de pouvoir établir une relation entre les mesures du temps dans les deux référentiels. Les deux temps distincts des deux référentiels sont appelés temps "coordonnées" car ils font partie d'un système de coordonnées à quatre dimensions utilisé pour quadriller l'espace-temps et localiser les événements. Dans un référentiel donné, le temps-coordonnée correspond également au temps mesuré par un observateur immobile dans ce référentiel. Ainsi, en relativité restreinte, un référentiel peut être représenté par une classe d'observateurs fixes les uns par rapport aux autres, se déplaçant à la même vitesse et munis des mêmes horloges. Cela constitue un référentiel global. La métrique permet d'établir un lien entre les temps mesurés par deux classes d'observateurs ayant des vitesses différentes.

Pratiquement, il existe deux procédures pour relier le temps mesuré par ces deux classes d'observateurs, c'est-à-dire pour synchroniser leurs horloges :

1) La première procédure utilise des signaux lumineux : une horloge envoie un signal lumineux vers une deuxième horloge, qui le renvoie instantanément vers la première horloge. En mesurant le temps aller-retour du signal par la première horloge, ainsi que le temps de réflexion par la deuxième horloge, on peut définir opérationnellement la simultanéité. Cette procédure est connue sous le nom de synchronisation d'Einstein.

2) La deuxième procédure implique une horloge mobile : on synchronise une horloge A avec une horloge mobile, qui se déplace ensuite très lentement vers une seconde horloge B. La mesure de la différence de temps entre l'horloge B et l'horloge mobile permet de synchroniser les horloges A et B. Cette procédure est appelée synchronisation par transport lent d'horloges.

En relativité restreinte, ces deux procédures de synchronisation sont équivalentes, ce qui signifie qu'il est possible de synchroniser toutes les horloges de l'espace-temps de façon univoque.

Concentrons-nous maintenant sur une catégorie d'observateurs situés dans un référentiel en rotation, non-inertiel, tel que le référentiel terrestre dont les axes demeurent fixes par rapport à la Terre et qui est centré sur le centre de masse terrestre. De la même manière qu'un objet en chute libre ne peut pas suivre une trajectoire rectiligne et uniforme dans un référentiel non inertiel, la trajectoire d'un rayon lumineux ne peut être une ligne droite – c'est ce que l'on appelle l'effet Sagnac. Cet effet relève du référentiel, et donc des coordonnées. Dans le cas d'un système de positionnement par satellites tel que Galileo, l'omission de cet effet pour un utilisateur terrestre peut entraîner une erreur de positionnement d'environ trente mètres. Toutefois, un simple changement de coordonnées approprié permet de revenir à un référentiel inertiel et de ramener les trajectoires des rayons lumineux à des lignes droites. Cela constitue l'une des caractéristiques de l'espace-temps de la relativité restreinte. Ce n'est plus valide dans le cadre de la relativité générale, en présence de matière et d'énergie.

4 – Relativité générale et simultanéité

En 1916, Albert Einstein généralise la théorie de la relativité et propose une explication selon laquelle la gravitation est due à la déformation de l'espace-temps. Au lieu d'être considérée comme une force, la gravité est interprétée comme la courbure de l'espace-temps causée par la présence d'objets massifs et d'énergie. Cette courbure affecte les mesures effectuées par un observateur avec une intensité variable en fonction de la compacité de l'objet. Dans cette nouvelle théorie les caractéristiques de l'espace-temps de la relativité restreinte ne peuvent être applicables que localement, à proximité d'un événement sur une échelle bien inférieure la "taille" de sa courbure. Ainsi, sur une étendue de l'espace-temps de taille égale ou supérieure à sa courbure caractéristique, il n'est plus possible de trouver un changement de coordonnées permettant de transformer les trajectoires des rayons lumineux en lignes droites : le tissu de l'espace-temps est déformé tel un drap ondulé.

Nous pouvons avoir une certaine intuition des propriétés de l'espace-temps courbe. De la même manière que nous avons transformé la géométrie euclidienne de l'espace tridimensionnel en une géométrie "pseudo-euclidienne" à quatre dimensions dans le cas de la relativité restreinte, nous allons altérer la géométrie courbe – ou riemannienne – de la sphère bidimensionnelle pour obtenir une géométrie "pseudo-riemannienne" à quatre dimensions. Ainsi, certaines caractéristiques de l'espace-temps de la relativité générale peuvent être représentées par analogie à la surface courbée d'une sphère.

Par exemple, les "lignes droites" de la sphère, appelées géodésiques, correspondent aux grands cercles de la sphère, qui sont en réalité des trajectoires fermées. Ce phénomène se retrouve également dans les orbites planétaires : bien qu'elles ne subissent aucune force – puisque la gravitation n'est plus considérée comme une force – leurs trajectoires ne sont pas uniformément rectilignes, mais plutôt des géodésiques (fermées) de l'espace-temps. On peut également remarquer qu'il n'est pas possible de trouver un changement de coordonnées sur une sphère permettant de représenter tous les méridiens – qui sont des géodésiques – comme des droites sur un plan. Par exemple, grâce à une projection cylindrique, il est possible de transformer un seul grand cercle – une géodésique – en une droite, mais les autres grands cercles restent toujours des courbes sur le plan. Cela représente l'une des caractéristiques des espaces courbes, et cela reste encore un défi aujourd'hui lorsque l'on souhaite cartographier la surface terrestre. Il est également intéressant de noter que deux méridiens terrestres finissent par se croiser aux pôles, bien qu'ils soient tous deux considérés comme des "parallèles" sur la sphère.

Observons à présent une conséquence pratique plutôt contrariante de la courbure de l'espace-temps : il est impossible de synchroniser toutes les horloges de manière globale en utilisant les procédures précédemment expliquées dans le cadre de la relativité restreinte. Supposons que nous utilisions la procédure de synchronisation d'Einstein : en synchronisant une horloge A avec une horloge B, puis une horloge C avec l'horloge B, les horloges A et C ne seront généralement pas synchronisées entre elles ; cette procédure se révèle non transitive. Il devient donc nécessaire de trouver un nouveau moyen pour synchroniser les horloges.

Ce nouveau moyen est appelé “synchronisation coordonnée” et s’opère à travers la métrique de l’espace-temps. La métrique permet de relier le temps mesuré par n’importe quelle horloge à un temps-coordonnée, c’est-à-dire la coordonnée temporelle du référentiel spatio-temporel qui quadrille l’espace-temps afin de repérer ses événements. Par conséquent, la connaissance d’un modèle géométrique de l’espace-temps, représenté par la métrique, nous permet de construire un temps mathématique à partir des mesures des horloges. Ce temps est conventionnel et requiert une entente internationale concernant la forme de la métrique, c’est-à-dire le choix conventionnel du référentiel spatio-temporel.

Lorsqu’une horloge se déplace à faible vitesse autour d’une planète ou d’une étoile, le temps s’écoule différemment en fonction de sa distance par rapport à la masse. Cet effet est connu sous le nom de décalage d’Einstein ou décalage vers le rouge gravitationnel. Les horloges atomiques optiques permettent de détecter cet effet même pour des déplacements centimétriques dans le potentiel gravitationnel de la Terre. De manière plus courante, cet effet est mesuré par les horloges des systèmes de positionnement par satellites tels que le GPS ou Galileo. La différence de temps propre entre les horloges des satellites et celles des utilisateurs de la constellation doit être pris en compte pour éviter des erreurs de plus de 10 km par jour sur le géo-positionnement ! La synchronisation coordonnée des horloges du système de positionnement spatio-temporel permet alors de construire un temps commun a posteriori, grâce auquel les utilisateurs vont pouvoir dater tous les événements de façon univoque.

5 – Échelles de temps et référentiels spatio-temporels

La synchronisation des horloges avec la “synchronisation coordonnée” est la plus couramment utilisée pour l’élaboration d’échelles de temps telles que le Temps Atomique International (TAI) et les échelles de temps des systèmes de navigation par satellite (GNSS). Cependant, pour que cette convention devienne opérationnelle, il est nécessaire de définir des systèmes de référence relativistes conventionnels, au travers de l’établissement d’une métrique de l’espace-temps conventionnelle.

En 1979, il a été proposé par Ashby et Allan de construire une “grille de temps-coordonnée” globale sur et autour de la Terre³¹, réalisant ainsi l’idée d’une convention de “synchronisation coordonnée” pour les horloges qui ne posait pas le problème de non-transitivité de la synchronisation d’Einstein. Les auteurs proposent alors de prendre comme référence une horloge sur le géoïde³², c’est-à-dire de choisir un système de référence conventionnel R tel que le temps propre d’une

³¹ Ashby, N., Allan, D.W., « Practical Implications of Relativity for a Global Coordinate Time Scale », *Radio Science*, Vol. 14, n°4, 1979, pp. 649-669.

³² Au sens Newtonien, le géoïde est une surface équipotentielle du potentiel de pesanteur terrestre qui coïncide avec la surface moyenne des océans. Elle peut servir de surface de référence pour la mesure des altitudes. Pour une introduction sur ces notions voir Duquenne, F., « Le champ de pesanteur en quelques mots », *Revue XYZ*, n. 139, 2014, pp. 15-16.

horloge au repos sur le géoïde coïncide avec son temps-coordonnée dans R. Ce choix est pratique car il implique que le décalage gravitationnel en fréquence d'une horloge dépend de son altitude. La principale limitation à la réalisation d'une telle grille de temps-coordonnée globale devient alors la connaissance du géoïde, ou encore de l'altitude des horloges qui définissent l'échelle de temps.

Il est intéressant de noter que la question de la synchronisation des horloges a suscité une controverse dans les années '80, en raison du développement du système de positionnement global Navstar (GPS) et de la nécessité d'une échelle de temps globale. Cette question est examinée par A.J. Skalafuris, où l'auteur conclut : « En principe, l'espace courbe de Schwarzschild ne peut pas être intégré dans un espace plat à quatre dimensions sans l'ajout de dimensions supplémentaires. Ainsi, la base théorique du système de navigation GPS semble être défectueux et un nouvel algorithme devrait être construit »³³. En effet, la convention de temps-coordonnée ne peut être réalisée théoriquement que dans des schémas d'approximation.

Sur ce point, la réflexion de Bachelard est très intéressante : « La division classique qui séparait la théorie de son application ignorait cette nécessité d'incorporer les conditions d'application dans l'essence même de la théorie. [...] C'est alors qu'on s'aperçoit que la science réalise ses objets, sans jamais les trouver tout faits. La phénoménoteknikue étend la phénoménologie. Un concept est devenu scientifique dans la proportion où il est devenu technique, où il est accompagné d'une technique de réalisation »³⁴. Ainsi, la controverse de la constitution d'un temps global pour le développement du GPS découle de cette dialectique nouvelle entre théorie et application. La technique de réalisation d'un système de référence spatio-temporel va conditionner le développement théorique de ce système.

A la suite de ses travaux, N. Ashby propose une résolution concernant la "grille de temps-coordonnée" globale lors du symposium n° 114 de l'Union astronomique internationale (UAI)³⁵. Cette résolution n'a pas été adoptée car le président du comité d'organisation scientifique, J. Kovalesky, a estimé que les spécialistes en mécanique céleste et en astrométrie avaient besoin de plus de temps pour étudier le problème dans les commissions compétentes de l'UAI. À la suite de ce symposium, plusieurs auteurs ont contribué à la définition des échelles de temps-coordonnée, qui a aussi nécessité la définition d'un système de référence relativiste quadridimensionnel. Ces travaux ont abouti à la série de résolutions de l'UAI de 1991 et 2000 qui définissent les systèmes de référence ainsi que les échelles de temps actuels.

Nous résumons ici très brièvement ces résolutions. Un système de référence relativiste est implicitement défini en donnant les composantes du tenseur métrique dans ce système de référence, en plus d'une origine spatiale et d'une orientation

³³ Skalafuris, A.J., « Current Theoretical Attempts Toward Synchronization of a Global Satellite Network », *Radio Science*, Vol. 20, n°6, 1985, pp. 1529-1536, p. 1536, traduction de la citation des auteurs.

³⁴ Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, cit.

³⁵ Rapporté dans Brumberg, V.A., « General Discussion », in Kovalesky, J., Brumberg, V.A. (eds.), *Relativity in Celestial Mechanics and Astrometry: High Precision Dynamical Theories And Observational Verifications*, Dordrecht, Springer, 1986.

spatiale des axes du repère, et une origine temporelle conventionnelle pour la coordonnée temporelle (l'orientation temporelle est triviale). Le tenseur métrique est une solution des équations d'Einstein dans l'approximation des faibles vitesses et des faibles champs gravitationnels pour un ensemble de N corps.

Pour modéliser des phénomènes au voisinage de la Terre, tels que son champ de pesanteur, les satellites artificiels en orbite autour de la Terre ou la rotation de la Terre, l'UAI recommande l'utilisation du GCRS (Système de Référence Céleste Géocentrique), où la coordonnée temporelle est définie en tant que TCG (Temps-Coordonnée Géocentrique). Ce temps-coordonnée représente le temps propre d'une horloge située à une distance infinie de la Terre.

Cependant, dans la pratique, nous utilisons une autre échelle de temps conventionnelle appelée TT (Temps Terrestre), qui diffère du Temps-Coordonnée Géocentrique par un ratio constant. En première approximation, le Temps Terrestre peut être réalisé par une horloge positionnée sur le géoïde. Cependant, il est en fait réalisé en utilisant un ensemble d'horloges atomiques extrêmement précises et stables à long terme³⁶. Si une horloge n'est pas située sur le géoïde, une correction en fréquence proportionnelle à son altitude est nécessaire pour obtenir le Temps Terrestre. Cette échelle temporelle conventionnelle est connue sous le nom de Temps Atomique International (TAI), à partir duquel le Temps Universel Coordonné (UTC) est défini et utilisé dans le monde entier. Ainsi, le temps auquel chacun synchronise sa montre ou son téléphone intelligent est en réalité un temps mathématique qui n'a de sens que dans le cadre d'un espace-temps courbe à quatre dimensions.

De nombreuses applications ont besoin d'une représentation physique de TAI/UTC. Pour cela, les instituts de métrologie participants à TAI/UTC réalisent des échelles de temps locales appelées UTC(k) pour l'institut k . Il s'agit d'échelles de temps physiques réalisées avec un ensemble d'horloges atomiques permettant de produire un signal ininterrompu que l'on utilise dans divers dispositifs de comptage et de dissémination, réalisant ainsi une mise en œuvre concrète des principes décrits dans les sections précédentes. Des moyens de comparaisons permettent de comparer entre elles les échelles de temps UTC(k) et les horloges y participant. Ces informations de comparaison, ainsi que les informations nécessaires pour prendre en compte le cadre relativiste sont fournies au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) pour servir de base au calcul de TAI/UTC. En retour, le calcul fait par le BIPM donne l'écart entre chaque UTC(k) et UTC, ce qui permet à chaque institut de piloter son UTC(k) pour qu'il suive UTC. Cette architecture permet aussi d'utiliser un ensemble de 10 à 20 horloges primaires à atomes de césium réparties dans une dizaine d'instituts de métrologie pour mesurer l'intervalle de temps de TAI/UTC par rapport à la définition de la seconde.

Les échelles de temps physique UTC(k) servent de base à la dissémination d'UTC pour toutes les utilisations scientifiques ou sociétales. Cela inclut en particulier la synchronisation et la datation des événements dans les systèmes per-

³⁶ Voir Petit, G., Panfilò, G., « Comparison of Frequency Standards Used for TAI », *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 62, n°6, 2013, pp. 1550-1555.

mettant de réaliser les référentiels spatio-temporels. On estime que les meilleures UTC(k) dévient de l'échelle de temps calculée UTC de quelques nanosecondes. On se reportera à l'article de Gianna Panfilo pour une description complète de l'architecture de TAI/UTC et de ses caractéristiques.

6 – La démarche heuristique de la métrologie

Le cadre relativiste, qui traite l'espace-temps courbe à quatre dimensions comme un tout indissociable, s'applique non seulement à la construction des échelles de temps, mais également à la construction des référentiels spatiaux. En effet, ces deux aspects sont étroitement liés, car ils ne sont que les reflets d'un même objet géométrique : la métrique de l'espace-temps. Ainsi, l'espace émerge de la mesure du temps. Les référentiels modernes sont entièrement construits à partir de mesures de temps ou de fréquence. Par exemple, la construction du référentiel terrestre ITRS (Système de Référence Terrestre International) repose sur quatre techniques :

- 1) Les systèmes de positionnement par satellites, qui utilisent des mesures de temps de vol de signaux entre différentes horloges.
- 2) Le VLBI (Interférométrie à Très Longue Base), qui mesure les différences de temps d'arrivée entre différentes horloges en utilisant des signaux provenant de quasars lointains.
- 3) Le SLR (Satellite Laser Ranging), qui mesure les temps aller-retour de signaux laser réfléchis par des satellites.
- 4) Et enfin DORIS (Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré par Satellite), un système de positionnement qui mesure la fréquence des signaux micro-ondes.

Toutes ces mesures doivent être interprétées dans le cadre de la relativité générale afin d'obtenir la plus grande précision possible dans la construction du référentiel terrestre.

Nous voyons donc que le cadre conceptuel (les lois physiques et les mathématiques qui les sous-tendent) est réalisé, on pourrait dire matérialisé, grâce à un ensemble de mesures donné par des protocoles expérimentaux bien documentés, ainsi que des conventions internationales définies dans le cadre d'organisations internationales telles que le BIPM et l'UAI³⁷. Ces mesures en retour nous donnent des informations sur notre cadre conceptuel. Elles disent quelque chose de la réalité (en elle-même inaccessible) et donc nous renseigne sur le fait que notre cadre conceptuel est une "bonne" description de la réalité, c'est-à-dire qu'il existe une cohérence entre les prédictions des mesures calculées dans le cadre conceptuel et les mesures elles-mêmes. La non-cohérence entre les pré-

³⁷ L'UAI est une organisation non gouvernementale internationale alors que le BIPM est une organisation intergouvernementale.

diction des mesures et les mesures elles-mêmes peut être due à une erreur de mesure ou bien au fait que le cadre théorique utilisé n'est pas une bonne représentation de la réalité. Plus l'écart entre les deux est grand par rapport aux erreurs de mesures, plus la probabilité est grande que ce soit le cadre théorique qui doit être remis en question.

Cependant, l'estimation des erreurs de mesures est toujours très délicate car elle fait appel à une connaissance fine des instruments et des conditions expérimentales. Il est toujours possible d'avoir oublié une source d'erreur ou bien d'avoir mal estimé un des effets qui influence le résultat de l'expérience. Dans ce cas l'erreur est sous-estimée et peut faire croire que le cadre théorique n'est pas correct. Il existe plusieurs exemples d'expériences qui ont conduit certains chercheurs à remettre en question un cadre théorique alors que le problème provenait plutôt d'un effet non pris en compte dans le bilan d'erreur, par exemple l'anomalie Pioneer³⁸ ou encore les neutrinos qui vont plus vite que la lumière³⁹.

Dans la théorie de la relativité générale, le temps est à la fois du côté du cadre conceptuel (temps-coordonnée) et du côté des mesures (temps propre). Ainsi, la réalisation d'un système de références spatio-temporel nous permet d'unifier une vision purement formelle de l'espace-temps (la théorie), et les mesures que l'on peut en faire (basées sur des instruments que l'on fabrique et que l'on comprend grâce à ce même cadre conceptuel). L'intérêt provient du fait que parfois (souvent) nos mesures ne correspondent pas à leur prédiction. C'est là tout l'intérêt, heuristique, de cette démarche. Cela nous permet de faire des découvertes : une nouvelle loi physique, une meilleure description (modèle) de nos instruments de mesures, de nos procédures expérimentales, etc.

Cet entremêlement de la technique et de la théorie et son pouvoir heuristique sont bien exprimés par Bachelard :

Ainsi, l'essor de la pensée scientifique dans ses formes contemporaines se révèle comme une solidarité du génie et de la technique. [...] si l'on aborde vraiment la réflexion sur une technique qui, déjà, est un aboutissant de la réflexion, on se rendra compte que le circuit qui va sans cesse, dans la pensée scientifique, de la théorie à la technique et des résultats techniques nouveaux aux refontes théoriques nous livre un mouvement humain nouveau. 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. On ne peut concevoir, croyons-nous, un arrêt de ce déterminisme à deux termes, à deux voies. Sous ces deux formes, ce déterminisme de la pensée et de l'expérience scientifiques fait la preuve de sa double fécondité. Il est un augmentatif humain.⁴⁰

³⁸ Turyshev, S.G., et al., « Support for the Thermal Origin of the Pioneer Anomaly », *Physical Review Letters*, Vol. 108, n°24, 2012.

³⁹ Cho, A., « Once Again, Physicists Debunk Faster-Than-Light Neutrinos », *Science*, 2012, <https://www.science.org/content/article/once-again-physicists-debunk-faster-than-light-neutrinos> (dernière consultation 21.03.2024).

⁴⁰ Bachelard, G., *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, cit.

Nous allons illustrer cette fécondité avec deux exemples : l'expérience historique du pendule des astronomes, et son pendant moderne avec des horloges atomiques.

6.1 – Le pendule des astronomes

Depuis longtemps, la forme de la Terre a suscité des interrogations, des hypothèses et des expérimentations. Dans l'Antiquité grecque, les philosophes l'imaginaient sphérique ou plate⁴¹. Ératosthène a établi un lien entre l'inclinaison des rayons solaires et la forme supposée sphérique de la Terre, ce qui lui a permis de déduire sa circonférence. Le Soleil lui-même était utilisé comme moyen de mesure du temps, par exemple à l'aide d'un gnomon. Ainsi, on peut déjà observer un lien entre un instrument de mesure du temps, le gnomon, et la forme de la Terre, alors inaccessible. Plus tard, la connaissance de la forme de la Terre s'est étendue à celle de son champ de pesanteur, ce qui a donné naissance à la géodésie physique.

Un pendule est un instrument très simple : une masse est reliée par un fil à un point fixe. Ce fil a une longueur fixe. Naturellement, la direction du fil du pendule au repos est verticale, car la masse est attirée par la Terre : c'est la direction de la pesanteur. Si on écarte la masse de sa position verticale, alors elle tombe vers le bas sous l'effet de son poids puis remonte, dans un mouvement de va-et-vient. La durée d'un va-et-vient s'appelle la période du pendule. On peut la mesurer en secondes.

Il y a un lien physique entre la période du pendule, la longueur de son fil, et la force de la pesanteur. Si le fil est plus long, alors la distance parcourue par le pendule lors d'un va-et-vient est plus longue, et donc la période du pendule augmente. Si la pesanteur est plus forte, la masse tombe plus vite et donc la période du pendule diminue. C'est ce lien quantifiable entre différentes grandeurs physiques qui fait du pendule un instrument scientifique, dont les savants du ^{XVII}^{ème} et ^{XVIII}^{ème} siècle se sont emparés pour établir un lien entre le temps et l'espace, entre la durée et la longueur.

Le désir d'établir une mesure universelle était l'une des raisons pour lesquelles le pendule à secondes accompagnait les astronomes dans leurs voyages. Une mesure universelle est très importante pour les astronomes et les physiciens qui prétendent à l'universalité des théories physiques, mais aussi pour les commerçants pour mesurer les quantités des produits échangés.

L'abbé Picard, géodésien et astronome français, a mis en avant l'importance de sauvegarder la toise de Paris comme étalon de mesure universelle de distance. Le pendule offrait la possibilité de lier la longueur de la toise de Paris à sa période, pour pouvoir ensuite le transporter partout dans le monde. Cependant ce projet s'est heurté au fait que la Terre n'est pas une sphère parfaite, et donc que la pesanteur n'a pas la même force partout sur Terre : la relation entre la longueur et la période du pendule n'est en fait pas universelle. Ce phénomène a été observé pour la première fois par Jean Richer, astronome de l'Observatoire de Paris, lors de son

⁴¹ Danielle, J., *Le Monde comme le voyaient les Grecs*, Paris, Les belles lettres, 2018.

expédition à Cayenne entre 1672 et 1673. Après 10 mois d'observations, Richer a constaté que la période du pendule à secondes mesurées à Cayenne était plus longue que celle mesurée à Paris. En une journée, le pendule effectuait à Cayenne 148 oscillations de moins qu'à Paris, comme si sa longueur était plus grande.

En supposant que la longueur du fil ne change pas, ce dont Richer s'était assuré, il fallait donc que ce soit la pesanteur qui soit plus faible à Cayenne qu'à Paris. Or, Cayenne est beaucoup plus proche de l'équateur que Paris. Newton, le savant anglais qui a développé la théorie de la gravitation universelle, prenait au sérieux les mesures de Richer. Dans sa théorie, la force gravitationnelle est d'autant plus faible que l'on s'éloigne de la Terre, et donc Cayenne devait être plus éloignée du centre de la Terre que Paris. Cela corroborait une autre de ses hypothèses : la Terre est aplatie aux pôles à cause de sa rotation sur elle-même.

On voit dans cet exemple le lien étroit entre théorie et observations, qui n'est pas aussi simple que l'on peut le penser naïvement : les observations (ici la réalisation d'un étalon qui réalise la seconde) nous guident dans la construction d'un modèle théorique simplifié, qui est ensuite confronté aux observations, qui peuvent nous conduire à réviser notre modèle. Et ainsi de suite... C'est un processus de construction – de compréhension de monde – itératif, qui évolue de concert avec l'évolution technique des instruments de mesures.

6.2 – La figure de la Terre et les horloges atomiques

L'augmentation de la stabilité et de l'exactitude des horloges a nécessité d'en comprendre leur fonctionnement intime. Nous avons vu comment en étudiant les systématismes associés au pendule qui bat la seconde, celui-ci a permis d'établir et de vérifier des hypothèses importantes concernant la figure de la Terre. L'usage de l'horloge a été détourné pour devenir un instrument de mesure de la pesanteur. Plus précisément, une synergie s'est établie entre l'amélioration d'une application pratique, la mesure du temps, et la connaissance scientifique des phénomènes qui régissent celle-ci. La qualité et la nature des meilleures horloges a beaucoup évolué depuis les horloges à pendule : nous utilisons aujourd'hui des horloges atomiques. Nos moyens d'étudier la figure de la Terre ont aussi beaucoup évolué, et notamment ont connu une révolution avec l'avènement des satellites géodésiques comme GRACE et GOCE. Cependant, nous allons voir comment nous envisageons de nouveau d'utiliser les horloges pour améliorer notre connaissance de la Terre et de son champ de pesanteur.

L'extrême exactitude des horloges optiques s'est accompagnée, comme pour le pendule qui bat la seconde, d'une connaissance fine de leurs systématismes et donc de leur modélisation physique. La description locale d'une telle horloge fait appel à nos connaissances de la théorie quantique, alors que la description de la comparaison à distance des horloges fait appel à la théorie de la relativité générale. Nous avons vu que la comparaison de deux horloges placées dans des champs gravitationnels différents, donc dans un espace-temps muni d'une courbure non-nulle, conduit à une différence de fréquence apparente entre les deux horloges, ou décalage vers le rouge gravitationnel.

Cet effet est une conséquence directe du principe d'équivalence d'Einstein, un des piliers de toute la physique moderne. Considérons un photon émis depuis un point A dans un système de référence accéléré vers un point B qui est en direction de l'accélération. Nous supposons que les points A et B sont fixes et séparés par une distance h_0 dans le référentiel accéléré. Le temps de vol du photon est alors $\Delta t = h_0/c$, où c est la vitesse de la lumière dans le vide. Pendant ce temps Δt la vitesse du référentiel augmente d'une quantité $\Delta v = a\Delta t = ah_0/c$, où a est la magnitude de l'accélération \vec{a} du référentiel. L'effet Doppler prédit alors un décalage en fréquence entre la fréquence de réception du signal au point B, ν_B , et la fréquence d'émission au point A, ν_A , d'une quantité $\nu_B/\nu_A = 1 - \Delta v/c = 1 - ah_0/c$.

Or, le principe d'équivalence d'Einstein postule l'équivalence entre le vecteur accélération de la pesanteur \vec{g} et un champ d'accélération \vec{a} , tel que $\vec{a} = -\vec{g}$. Nous déduisons que dans un référentiel non accéléré en présence d'un champ de pesanteur \vec{g} : $\nu_B/\nu_A = 1 - gh_0/c$, où g est la magnitude du vecteur \vec{g} . ν_A est la fréquence du photon à l'émission (fort potentiel de pesanteur) et ν_B est la fréquence du photon à la réception (faible potentiel de pesanteur). En effet, le vecteur accélération de la pesanteur est le gradient du potentiel de pesanteur, qui diminue donc entre le point A et le point B. Comme $\nu_B < \nu_A$, on dit généralement que la fréquence du signal à la réception est "décalée vers le rouge". On peut aussi considérer cet effet en termes de conservation de l'énergie. Intuitivement, le photon qui se déplace du point A au point B doit "travailler" afin de s'échapper de l'attraction due au champ de pesanteur. Il perd alors de l'énergie et sa fréquence décroît en vertu de l'équivalence entre énergie et fréquence.

Ainsi, si deux horloges (parfaites et identiques) sont placées en A et en B et que l'horloge en A (potentiel de pesanteur fort) est utilisée pour générer le signal de fréquence ν_A , alors le signal reçu en B (potentiel de pesanteur faible) aura une fréquence inférieure à celle d'un signal localement généré par l'horloge en B. La différence de fréquence mesurée entre le signal généré localement et le signal reçu nous renseigne alors sur la distance h_0 entre les deux horloges et le champ de pesanteur g . Une formule plus générale, valide pour un champ de pesanteur non uniforme et appliquée à deux horloges fixes à la surface de la Terre nous dit que cette différence de fréquence est proportionnelle à la différence des potentiels de pesanteur entre les deux horloges :

$$\frac{\nu_B - \nu_A}{\nu_A} = \frac{W_B - W_A}{c^2} \quad (1)$$

Le potentiel de pesanteur W est la somme du potentiel gravitationnel U et de l'énergie cinétique par unité de masse: $W = U + v^2/2$, où v est la vitesse de l'horloge dans un référentiel inertiel fixe par rapport aux étoiles lointaines et centré sur le centre de masse de la Terre (système de référence céleste géocentrique ou GCRS).

La formule (1) lie l'effet Einstein à une différence de potentiel de pesanteur ΔW et donc à une différence d'altitude Δh . On peut en déduire les ordres de grandeurs suivants: $\Delta v/\nu \sim 10^{-18} \leftrightarrow \Delta W \sim 0.1 \text{ m}^2/\text{s}^2 \leftrightarrow \Delta h \sim 1 \text{ cm}$. Autrement dit, on peut potentiellement détecter une différence d'altitude de 1 cm en comparant

deux horloges ayant une exactitude en fréquence relative de 10^{-18} . C'est la *géo-désie chronométrique*. Cela a été démontré expérimentalement pour la première fois en septembre 2010 par l'équipe du *National Institute of Standards and Technology* (NIST): l'équipe a comparé localement deux horloges optiques basées sur l'atome d'aluminium, puis a soulevé une des deux horloges de 33 cm. Ils ont alors observé un décalage en fréquence relative de $(4.1 \pm 1.6) \times 10^{-17}$. Plus récemment, en 2020, des équipes du RIKEN et de l'Université de Tokyo ont comparé les fréquences de 2 horloges optiques placées respectivement au rez-de-chaussée et en haut d'un gratte-ciel de Tokyo, d'une hauteur de 450 mètres. Ils ont pu vérifier l'effet de décalage vers le rouge gravitationnel avec une exactitude de l'ordre de 4 cm (ou 4×10^{-18} en fréquence relative).

Il faut préciser qu'afin de comparer des horloges optiques qui ont une exactitude en fréquence relative de l'ordre de 10^{-18} , il est nécessaire d'avoir des moyens de comparaison qui ne dégrade pas cette exactitude. Les moyens classiques de comparaison temps/fréquence par satellite n'atteignent pas cette performance. Cependant, de nouvelles méthodes basées sur le transfert temps/fréquence par fibre optique permettent de faire des comparaisons avec des précisions en fréquence relative bien meilleures que 10^{-18} sur des distances continentales⁴². De plus, des méthodes de transfert optique de temps/fréquence en espace libre sont développées, atteignant des stabilités de l'ordre de 3×10^{-19} en moins d'une heure⁴³, sur des distances de 300 km. De plus, afin d'être utiles à la géodésie, plusieurs projets d'horloges optiques transportables sont en cours de développement⁴⁴.

L'observation directe des différences du potentiel de pesanteur grâce aux comparaisons d'horloges est une mesure complètement nouvelle en géodésie physique, qui utilise généralement les mesures des gradients du potentiel de pesanteur (gravimétrie, gradiométrie). Cela ouvre de nouvelles perspectives en ce qui concerne la contribution des horloges optiques à la détermination du potentiel de pesanteur terrestre. Il reste à développer de nouveaux instruments ainsi que de nouvelles méthodes d'analyse permettant d'intégrer cette nouvelle observable aux autres. En effet, l'observation des différences du potentiel de pesanteur est complémentaire des observables classiques de la géodésie physique : elle donne accès à des échelles spatiales intermédiaires entre les méthodes satellitaires, qui donnent avec précision la figure de la Terre à grande échelle, et les méthodes au sol comme la gravimétrie, qui donnent accès aux courtes échelles du potentiel de pesanteur.

⁴² Voir par exemple Lisdat, C., et al., « A Clock Network for Geodesy and Fundamental Science », *Nature Communications*, n°7, 2016.

⁴³ Caldwell, E.D., et al., « Quantum-Limited Optical Time Transfer for Future Geosynchronous Links », cit.

⁴⁴ Voir par exemple, Grotti, J., et al., « Long-Distance Chronometric Leveling with a Portable Optical Clock », *Physical Review Applied*, Vol. 21, n°6, 2024.

Conclusion

Dans le cadre de la physique, la représentation et la réalisation des échelles de temps se basent sur l'identification, l'observation et la modélisation de phénomènes périodiques. Historiquement, la rotation de la Terre servait de référence pour mesurer le temps, mais des irrégularités ont conduit à l'adoption d'une transition atomique comme nouvelle référence. La physique propose quatre conceptions majeures du temps : comme mouvement, paramètre d'évolution des équations dynamiques, quantum d'énergie, et convention géométrique. Les avancées de la physique quantique et de la relativité ont transformé les références temporelles, menant à des horloges atomiques et leurs moyens de comparaisons extrêmement précis et stables. Aujourd'hui, les références temporelles combinent ces conceptions, permettant une mesure du temps adaptée aux exigences modernes et prescrites dans les conventions internationales. Depuis le point de vue de la métrologie, nous avons décrit en détail comment les théories de la physique quantique et de la relativité générale ont permis la construction de référentiels spatio-temporels utilisés de façon internationale, grâce à la construction de nouveaux instruments de mesures ainsi qu'à l'établissement de conventions internationales.

D'un point de vue épistémologique, nous avons montré comment la métrologie, grâce à l'étude fine de la cohérence entre les mesures et le cadre théorique qui les prédit, peut permettre de détecter des incohérences et ainsi conduire à des avancées scientifiques significatives. Nous aurions pu aussi montrer comment les scientifiques ont milité en faveur d'un système horaire standardisé, du milieu du XVIII^{ème} siècle au milieu du XX^e siècle, accompagnant ainsi la régulation de nombreuses activités sociales comme les marchés, le trafic ferroviaire ou encore le travail⁴⁵. En effet, la réalisation des systèmes de références spatio-temporels fournissent un cadre absolu, universel, rigide qui s'est développé en même temps que le monde moderne industriel, et au même moment où Einstein montre que le temps physique est relatif. La maîtrise du temps, comme temps social, permet et donne le cadre à de multiples processus de dominations caractéristiques d'une société de production capitaliste où tout semble s'accélérer⁴⁶.

Nous avons mentionné plus haut que les étalons de fréquence basés sur les transitions optiques surpassaient de deux ordres de grandeurs les étalons primaires permettant de réaliser la définition actuelle de la seconde fondée sur la transition hyperfine du césium, les fontaines atomiques. La communauté du temps-fréquence, dans le cadre de la Convention du Mètre, a donc naturellement entrepris un processus pour étudier une possible redéfinition de la seconde à partir de transitions optiques. Lors de la 27^{ème} Conférence Générale des Poids et Mesures (2022), la résolution 5 « Sur la future redéfinition de la se-

⁴⁵ Souchier, C., *Maîtriser le temps. Du projet scientifique au gouvernement des temporalités*, Vulaines-sur-Seine, Éditions du Croquant, 2018.

⁴⁶ Rosa, H., *Accélération. Une critique sociale du temps*, Paris, La Découverte, 2010.

conde » encourageant le Comité International des Poids et Mesures et les états Membres à faire les efforts nécessaires pour permettre, si un certain nombre de conditions sont remplies, une redéfinition de la seconde en 2030. La résolution fait référence à la feuille de route développée par le “comité consultatif du temps et des fréquences” pour ce faire⁴⁷.

De plus, afin que les meilleures horloges optiques puissent participer à l'établissement d'un temps-coordonnée global, il faut pouvoir les comparer sur des échelles intercontinentales. Cela n'est pas encore possible. Il existe donc de nombreux développements dans ce sens, et en particulier la création de moyens de comparaison optique en espace libre (et non au travers de fibres optiques), qui pourraient permettre un jour des liaisons satellitaires. Cependant, les horloges au sol pourraient être limitées par la connaissance des effets qui perturbent la mesure de leur fréquence, et en particulier la connaissance d'un modèle suffisamment complet des répartitions et des variations des masses à la surface et à l'intérieur de la Terre, et à celles qui composent l'atmosphère. Pour s'affranchir de ces effets et dans la perspective de l'établissement d'une échelle de temps globale, il pourrait être avantageux de transporter quelques horloges optiques dans des satellites en orbite loin de la surface terrestre. Les horloges atomiques terrestres deviendraient alors des outils de mesure de la forme de la Terre et de son potentiel gravitationnel, et de ses variations. Il existe déjà des projets de telles horloges dédiées à la mesure des différences de potentiel de pesanteur : les horloges optiques transportables.

Pacôme Delva

SYRTE, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS
Sorbonne Université, LNE, 61 avenue de l'Observatoire 75014 Paris
Pacome.Delva@obspm.fr

Sébastien Bize

SYRTE, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS
Sorbonne Université, LNE, 61 avenue de l'Observatoire 75014 Paris
sebastien.bize@obspm.fr

Bibliographie

- Ashby, N., Allan, D.W., « Practical Implications of Relativity for a Global Coordinate Time Scale », *Radio Science*, Vol. 14, n°4, 1979, pp. 649-669.
- Baccetti, V., et al., « Inertial Frames without the Relativity Principle », *Journal of High Energy Physics*, Vol. 2012, n°5, 2012.
- Bachelard, G., « Noumène et microphysique », *Recherches philosophiques*, n. 1, 1931, pp. 55-65, in Id., *Études*, Paris, Vrin, 1970, pp. 11-24.
- Bachelard, G., *L'intuition de l'instant*, Paris, Gonthier, 1932.

⁴⁷ On trouve les éléments de cette feuille de route dans l'article Dimarcq, N., et al., « Road-map Towards the Redefinition of the Second », *Metrologia*, Vol. 61, n°1, 2024.

- Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, Félix Alcan, 1934.
- Bachelard, G., *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine*, Paris, Félix Alcan, 1937.
- Bachelard, G., *La dialectique de la durée*, Paris, PUF, 1950.
- Bachelard, G., *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, PUF, 1951.
- Brumberg, V.A., « General Discussion », in Kovalesky, J., Brumberg, V.A. (eds.), *Relativity in Celestial Mechanics and Astrometry: High Precision Dynamical Theories And Observational Verifications*, Dordrecht, Springer, 1986.
- Caldwell, E.D. et al., « Quantum-Limited Optical Time Transfer for Future Geosynchronous Links », *Nature*, n°618, 2023, pp. 721-726.
- Castelão Lawless, T., « La création et le développement de la phénoménotecnique dans l'œuvre de Gaston Bachelard », *Cahiers Gaston Bachelard*, Vol. 1, n°1, 1998, pp. 49-57.
- Chazal, G., « Bachelard et la relativité », *Cahiers Gaston Bachelard*, Vol. 12, n°1, 2012, pp. 37-48.
- Cho, A., « Once Again, Physicists Debunk Faster-Than-Light Neutrinos », *Science*, 2012, <https://www.science.org/content/article/once-again-physicists-debunk-faster-light-neutrinos> (dernière consultation 21.03.2024).
- Cutler, L.S., « Fifty Years of Commercial Caesium Clocks », *Metrologia*, Vol. 42, n°3, 2005.
- Danielle, J., *Le Monde comme le voyaient les Grecs*, Paris, Les belles lettres, 2018.
- Dennett, D., « Consciousness Explained », London, Penguin Books, 1991.
- Dimarcq, N., et al., « Roadmap Towards the Redefinition of the Second », *Metrologia*, Vol. 61, n°1, 2024.
- Dimarcq, N., Sagnes, I., « La démesure de la précision », CNRS Le Journal, <https://lejournel.cnrs.fr/billets/la-demesure-de-la-precision> (dernière consultation 17.08.2024).
- Dolbeault, J., « Einstein et l'univers-bloc », *Revue d'histoire des sciences*, n°71.1, 2018, pp. 79-109.
- Duquenne, F., « Le champ de pesanteur en quelques mots », *Revue XYZ*, n. 139, 2014, pp. 15-16.
- Einstein, A., « Zur Elektrodynamik bewegter Körper », *Annalen der Physik*, n° 17, 1905, pp. 895-921.
- Einstein, A., *Relativity: The Special and General Theory*, eng. tr. by R.W. Lawson, London, Methuen, 1920, (*Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Braunschweig, Vieweg, 1917).
- Grotti, J., et al., « Long-Distance Chronometric Leveling with a Portable Optical Clock », *Physical Review Applied*, Vol. 21, n°6, 2024.
- Guinot, B., Arias, E.F., « Atomic Time-Keeping from 1955 to the Present », *Metrologia*, Vol. 42, n°3, 2005.
- Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML), *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, 2008.
- Leschiutta, S., « The Definition of the 'Atomic' Second », *Metrologia*, Vol. 42, n°3, 2005.
- Lévy-Leblond, J.-M., « L'avenir de la science, l'avenir d'une illusion ? », in *La science en question(s)*, Auxerre : Éditions Sciences Humaines, 2014.
- Lisdar, C., et al., « A Clock Network for Geodesy and Fundamental Science », *Nature Communications*, n°7, 2016.
- Petit, G., Panfilo, G., « Comparison of Frequency Standards Used for TAI », *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 62, n°6, 2013, pp. 1550-1555.
- Ramsey, N.F., « History of Early Atomic Clocks », *Metrologia*, Vol. 42, n° 3, 2005 ; Leschiutta, S., « The Definition of the 'Atomic' Second », *Metrologia*, Vol. 42, n°3, 2005.
- Rosa, H., *Accélération. Une critique sociale du temps*, Paris, La Découverte, 2010.
- Skalafuris, A.J., « Current Theoretical Attempts Toward Synchronization of a Global Satellite Network », *Radio Science*, Vol. 20, n°6, 1985, pp. 1529-1536.
- Souchier, C., *Maîtriser le temps. Du projet scientifique au gouvernement des temporalités*, Vulaines-sur-Seine, Éditions du Croquant, 2018.
- Stoyko, A., Stoyko, N., « Les fluctuations périodiques de la rotation de la terre pendant les années 1933-1940. Conclusions pour la période 1933-1954 », *Bulletins de l'Académie Royale de Belgique*, Vol. 42, 1956, pp. 693-702.

- Terrien, J., « News from the International Bureau of Weights and Measures », *Metrologia*, Vol. 3, n°1, 1967.
- Turyshev, S.G., et al., « Support for the Thermal Origin of the Pioneer Anomaly », *Physical Review Letters*, Vol. 108, n°24, 2012.

Gianna Panfilo

Temps universel ou temps international ?

Introduction

This article will review the calculation of UTC by pointing out the general concepts of “Universal” and “International”¹. To highlight these characteristics of UTC it will be presented how it is defined, how it is calculated and how it is used by different communities (communications, space, transport etc.)

The algorithm for the calculation of TAI/UTC has been designed to guarantee the reliability, long-term frequency stability, high frequency accuracy and accessibility of the time scale. It relies on clock readings and is highly dependent on the quality of the clock comparisons. The BIPM, in a coordinated effort with the world timing community, is dedicated to developing and improving these methods.

The BIPM assures the dissemination of UTC through *Circular T*; it is published monthly and today offers complete information for the benefit of National Metrological Institutes (NMIs), observatories and international organizations that contribute to its computation. In *Circular T* is reported the difference between UTC and each UTC(*k*) which is the physical realization of UTC made by each NMI (symbolized here by the letter *k*). This paper also describes the weekly rapid realization of UTC (UTC_r). The paper concludes with the application and metrological traceability of UTC. In Figure 1 a scheme of the different time scales and their relations is reported to help the understanding of the paper.

1. The Metre Convention

The Convention to “assure the international unification and improvement of the metric system” and its annexed regulations (commonly known as the “Metre Convention”), was signed on May 20, 1875, and amended in 1921. It is an international treaty, the purpose of which was the creation of an international organization called the BIPM. It is an example of the efforts made by countries in the second half of the 19th century to establish new forms of intergovernmental cooperation.

¹ Panfilo, G., Arias, F., *The Coordinated Universal Time (UTC)*, “Metrologia”, Vol. 56, n°4, 2019.

Since then, the aim of the BIPM continues to be to facilitate the standardization of measurements world-wide by enabling Member States to act together on matters related to measurement science.

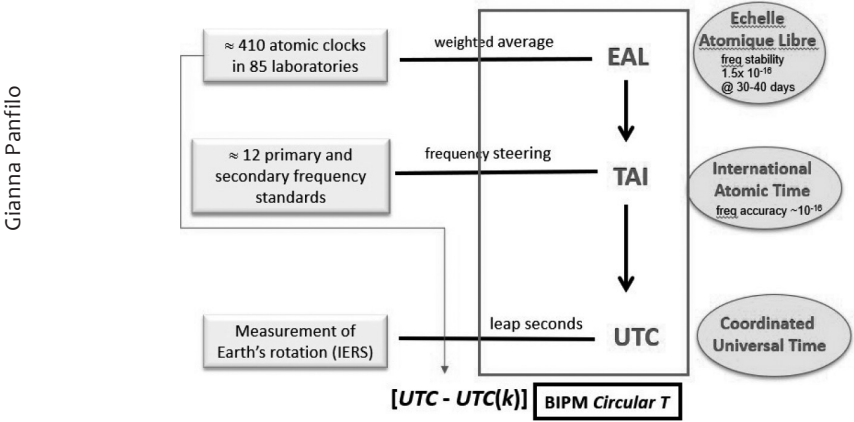


Figure 1. Representation of EAL, TAI, UTC, $UTC(k)$ and their relations.

If on May 20, 1875, the Metre Convention was signed in Paris by representatives of 17 States, now the signatories are 64 Member States and 36 Associate States and Economies. The first article of the “Metre Convention” creates the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) and the Article 3 states that the BIPM shall operate under the authority of the General Conference on Weights and Measures (CGPM) and the supervision of the International Committee for Weights and Measures (CIPM). In Figure 2 the historical document is reported. The CGPM is composed by official representatives of member states, the CIPM by eighteen individuals of different nationalities elected by the CGPM. The BIPM represents the scientific and technical secretariat dealing with international coordination and liaison, technical coordination by means of technical laboratories and capacity building program. The CIPM works by means of the Consultative Committees from which the CCTF (Consultative Committee for Time and Frequency) deals with the issues linked to the second and UTC.

2. International Atomic Time and Coordinated Universal Time

International Atomic Time (TAI) was established by the Consultative Committee for the Definition of the Second (CCDS) in 1971², after the adoption of the

² A.A.V.V., CCDS, “Metrologia”, Vol. 7, 1971, pp. 43-4.

atomic definition of the second by the 13th General Conference on Weights and Measures (CGPM) in 1968³. The practical, disseminated reference time scale Coordinated Universal Time (UTC), based on TAI, is equally stable and accurate as TAI, but while TAI is continuous, UTC is affected by one-second discontinuities, known as leap seconds, as a consequence of its definition adopted in 1970⁴.

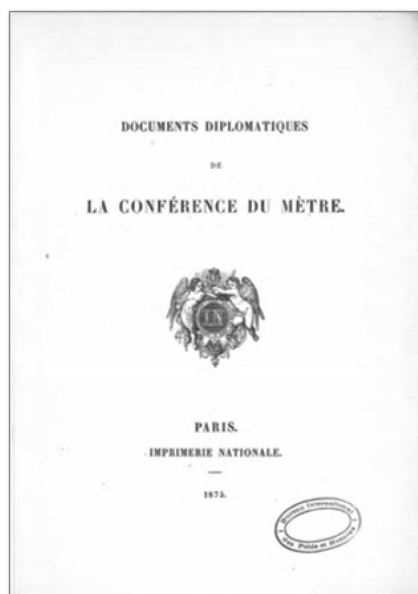


Figure 2. *The Metre Convention document*

The CGPM at its 15th meeting (1975) noted that Coordinated Universal Time (UTC), derived from TAI, provides the basis of civil time, and strongly endorses this usage. The last recommendation voted during the CGPM in 2018 gives a complete definition of TAI and UTC here reported⁵.

– International Atomic Time (TAI) is a continuous time scale produced by the BIPM based on the best realizations of the SI second. TAI is a realization of Terrestrial Time (TT) with the same rate as that of TT, as defined by the IAU Resolution B1.9 (2000)

³ A.A.V.V., *13th General Conference on Weights and Measures*, “Comptes Rendus de la 13e CGPM (1967/68)”, 1969, p.103; A.A.V.V., *13th CGPM*, “Metrologia”, Vol.4, 1968, p. 43.

⁴ A.A.V.V., *ITU-R Recommendations and Reports*, “TF Series. Recommendation ITU-R TF”, 2008, pp. 460-66.

⁵ A.A.V.V., *26th CGPM Resolution 2* (<https://www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/26-2018/resolution-2>).

– Coordinated Universal Time (UTC) is a time scale produced by the BIPM with the same rate as TAI, but differing from TAI only by an integral number of seconds.

This definition explicitly refers to TAI as a coordinate time, recognizing the need of a relativistic approach. TAI is the basis of realization of time scales used in dynamics, for modelling the motions of artificial and natural celestial bodies, with applications in the exploration of the solar system, tests of theories, geodesy, geophysics, and studies of the environment. Nevertheless, TAI was never disseminated directly and UTC, which was designed to approximate UT1 (a timescale derived from the rotation of the Earth), was chosen as the practical world time reference. At the time of its definition, UTC was the unique means of having real time access to UT1, as needed for some specific applications including astronomical navigation, geodesy, telescope settings, space navigation, satellite tracking, etc. The definition of UTC is based on the atomic second, but the time scale is synchronized to UT1 to maintain $|UT1 - UTC| < 0.9$ s. Since 1972, UTC differs from TAI by an integral number of seconds, changed, when necessary, by insertion of a leap second, as predicted and announced by the *International Earth Rotation and Reference System Service* (IERS). Since 2017 and until further notice, the offset between TAI and UTC is 37 s. Since 1988 the BIPM is responsible for the computation of TAI and UTC. The phenomenon taken as the basis of a timescale should be reproducible with a frequency that is, ideally, constant. This is never exactly the case, so we must be able to identify the causes of its variation, and to eliminate or at least minimize them. The realizations of the second of the International System of Units (SI) differ from the ideal duration specified in its definition (where the hyperfine splitting of the caesium 133 atom, at rest at a temperature of 0 K, is 9 192 631 770 Hz); in the process of constructing a timescale we should be capable of reducing these differences.

The reliability of a timescale is closely linked with the reliability of the clocks whose measurements are used for its construction; at the same time, redundancy is also required. In the case of the international reference timescale, a large number of clocks are needed; this number is today about 420, most of which are high-performance commercial caesium atomic standards and active hydrogen masers.

The frequency stability of a timescale represents its capacity to maintain a fixed ratio between its unitary scale interval and its theoretical counterpart. The frequency accuracy of a timescale represents the aptitude of its unitary scale interval to reproduce its theoretical counterpart. After the calculation of a timescale on the basis of an algorithm conferring the required frequency stability, the frequency accuracy can be improved by comparing the frequency (rate) of the timescale with that of primary frequency standards (PFS) or another more accurate time scale taken as a reference (for ex. most UTC(k) are steered to UTC; GNSS times are steered to a local UTC(k)), and by applying, if necessary, frequency (rate) corrections.

The accessibility/universality to a world-wide timescale represents its aptitude to provide a way of dating events for everyone. This depends on the precision that is required. We consider here only the ultimate precision, which necessitates an

observation of a few tens of days for reducing time transfer noise and profiting from the stability of the participating clocks. The long-term frequency stability required for a reference timescale in such a way is reached.

The instability of TAI, estimated today as 1 part in 10^{16} for averaging times of about 30 days, is obtained by processing clock and clock comparison data at 5-day intervals over a monthly analysis, with a delay to publication of less than ten days after the last date of data reported in the official document called BIPM *Circular T*⁶.

By analyzing the acronym's UTC and TAI we can find the characteristics previously described:

UTC – Coordinated Universal Time

– *Coordinated* – it means that UTC is coordinated by means of (broadcasted) time signals.

– *Universal* – it is an heritage of the previous astronomic definition – Universal Time but it means also

– that is universally valid, universally used in many applications. However, the time is only “universal” at the very close vicinity of the equipotential surface corresponding to the sea level. In consequence, according to Einstein's relativity, time cannot be universal.

– *Time* refers to the scale interval that is SI second TAI – International Atomic Time.

– *International* – that it has been adopted internationally.

– *Atomic* – that the definition of the second is based on universal (quantum) properties of atoms.

– *Time* refers to the scale interval that is SI second.

3. Computation of UTC and TAI

Different algorithms can be considered depending on the requirements of the scale. For an international reference such as UTC, the requirement is extreme reliability and long-term frequency stability. UTC therefore relies on the largest possible number of atomic clocks of different types, located in different parts of the world and connected via a network that allows precise time comparisons between remote sites. Each month the differences between the international time scale UTC and the local time scales UTC(*k*) maintained at the contributing time laboratories are reported at 5-day intervals in an official document called BIPM *Circular T*⁷. The various time laboratories worldwide achieve a stable local time scale based on individual atomic clocks or a clock ensemble. The clock readings reported by these laboratories are then combined at the BIPM through an algorithm designed to optimize the frequency stability and accuracy as well as the reliability of the time scale beyond the level

⁶ Circular T: <https://www.bipm.org/en/time-ftp/circular-t>.

⁷ *Ibidem*.

of performance that can be realized by any individual clock in the ensemble. The BIPM Time Department uses an appropriate algorithm [1,10] to generate the international reference UTC each month⁸. The calculation of UTC is carried out in three steps as illustrated in Figure 1:

- The free atomic time scale EAL is computed as a weighted average of about 420 free-running atomic clocks distributed world-wide. A clock weighting procedure has been designed to optimize the long-term frequency stability of the scale.

- The frequency of EAL is steered to maintain agreement with the definition of the SI second, and the resulting time scale is TAI. The steering correction is determined by comparing the EAL frequency with that of the PFS/SFS.

- Leap seconds are inserted to maintain agreement with the non-uniform time derived from the rotation of the Earth. The resulting time scale is UTC.

In Figure 3 the geographical representation of the laboratories participant in UTC is reported.

Geographical distribution of the laboratories that contribute to TAI and time transfer equipment (2023)

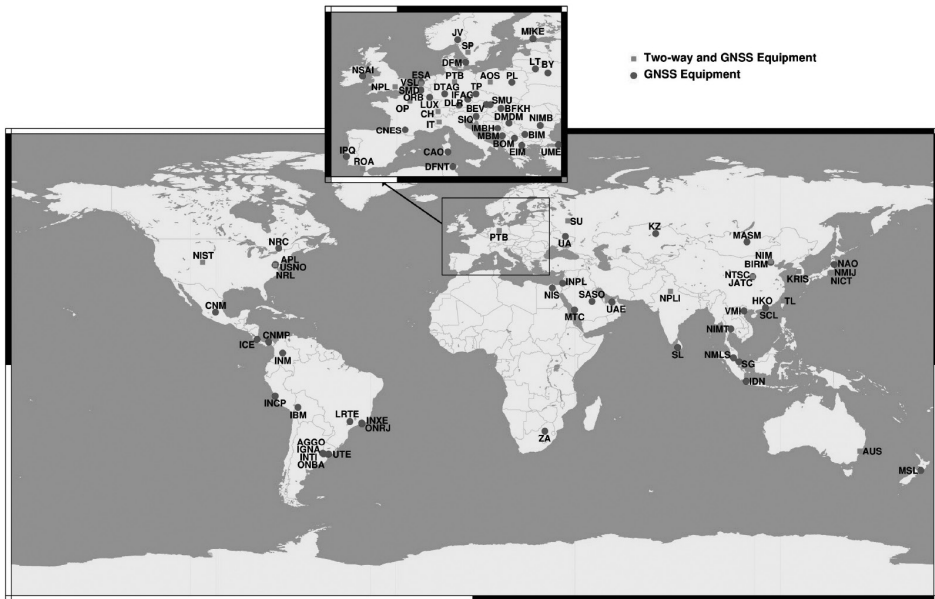


Figure 3. Geographical representation of the laboratories participant in UTC.

⁸ Panfilo, G., Arias, F., *op. cit.*; Panfilo, G., *The Coordinated Universal Time*, “The IEEE Instrumentation and Measurement Magazine”, Special Issue on “Women Contributions”, Vol. 19, n°3, June 2016, pp. 28-33.

3.1 Atomic clocks, Time Links and Primary and Secondary Frequency Standards

To contribute to UTC the time laboratories sent to the BIPM different data; atomic clocks, time links and one part of them Primary and Secondary Frequency Standard (PSFS) evaluation. In this section is reported a short description of these different contribution to UTC. The atomic clocks used in UTC calculation are about 420 from which 180 Caesium clocks, 180 Hydrogen Masers and 5 Rubidium fountains. In Figure 4 the total clocks (black line), the Hydrogen masers (gray line) and caesium clocks (dark gray line) are reported. As it can be observed in Figure 4, in the last 2 years the number of Hydrogen Masers is increased of about 20 as the number of Caesium clocks is decreased of about the same number; this guarantees a stable number of clocks participating in UTC calculation.

The network of UTC time links until now is supported by two independent techniques, the two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT, or shorter, TW) and those based on GNSS observations.

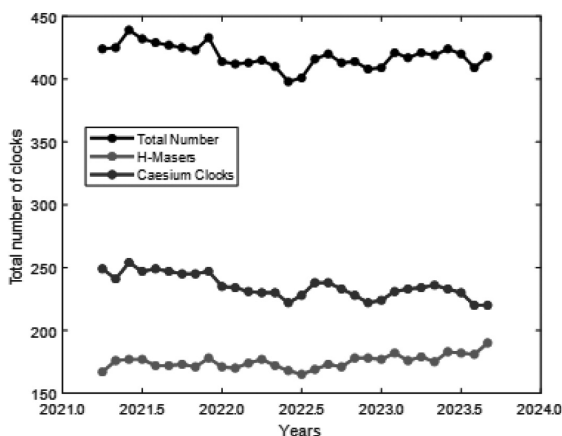


Figure 4. *The total clocks (black line), the Hydrogen masers (gray line) and Caesium clocks (dark gray line) participating in UTC.*

Several types of measurements exist for GNSS time transfer, e.g. single frequency code, dual frequency code, dual frequency code and phase for GPS. Moreover, new satellite systems as Galileo (European), GAGAN (Indian) and BeiDou (Chinese) will provide in the next future a very important number of measurements. For the TW in Europe, in North America and in Asia a complete set of redundant measurements is available. A global use of this ensemble of measurements will optimize the impact of the time links in UTC calculation by improving its metrological properties. Currently in UTC one pivot is used to compare clocks, the German laboratory PTB.

About 11 laboratories operate PSFS and contribute to the steering of EAL by submitting their data to the BIPM. In Figure 5 we can see the graphical representation of PSFS reported to the BIPM since Circular T 190. If the Cs Fountains (in the middle) contribute regularly since more then 10 years, we can observe then Optical clocks (on top) start to contribute in a regular way since 2020.

Gianna Panfilo

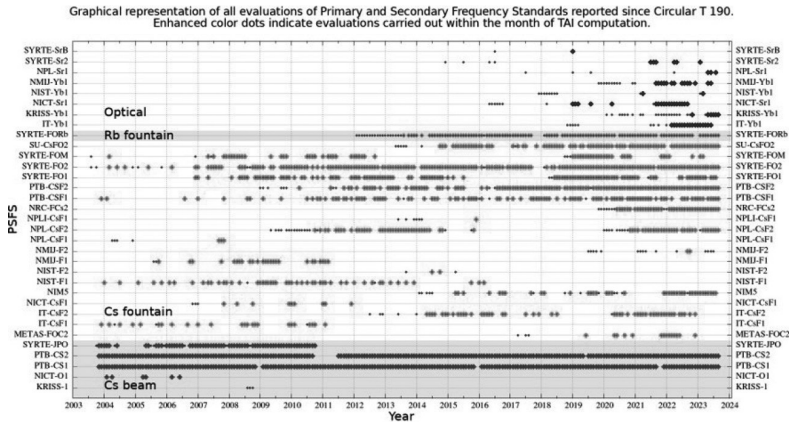


Figure 5. The PSFS contributing to the steering of EAL to obtain TAI.

4. UTCr

Considering the evolving needs of time metrology and the convenience of allowing the contributing laboratories access to a realization of UTC more frequently than through the monthly *Circular T*, the BIPM Time Department started in 2012 to implement the computation of UTCr⁹, a rapid realization of UTC published every week and based on daily data submitted daily. After 18 months of pilot experiment, UTCr has been declared operational and is now an official publication of the BIPM. Since 1988, UTC has been calculated with one-month data batches at five-day intervals. Extrapolation of values over 10 to 45 days based on prediction models is necessary to many applications. UTC, as published today, is not adapted for real and quasi-real time applications and it was recognized that a more rapid realization would be of benefit to a variety of applications. For these reasons, the BIPM provides UTCr, a new realization of UTC available with a shorter delay. The stability of UTCr was expected to be about comparable to that of UTC, albeit slightly worse because the number of participating clocks would necessarily be smaller and because, in general, a deferred solution (here UTC) is expected to be better than a rapid solution (UTCr). In order to achieve a similar performance, it

⁹ Petit, G., Arias, F., Harmegnies, A., *et. al.*, *UTCr: a rapid realization of UTC*, “Metrologia”, Vol. 51, 2014, pp. 33-39.

was decided to use the same algorithm (frequency prediction, weighting scheme) and to apply it in a similar manner with a calculation interval covering approximately one month. UTCr was designed to be a realization of UTC, i.e. in practice the goal is to minimize the time difference [UTCr-UTC]. For this purpose, a steering algorithm has to be implemented. In October 2023, 62 laboratories representing 74% of the clock weight in UTC participate to UTCr calculation. In Figure 6 the difference between UTC and UTCr is reported.

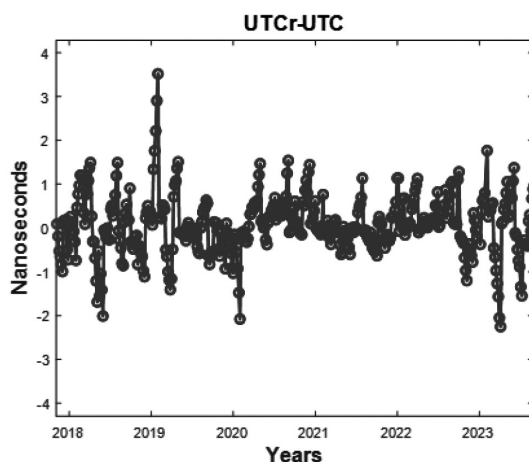


Figure 6. *Difference between UTC and UTCr.*

5. Application of UTC – traceability

UTC is the word reference universally used in the word for many applications, to facilitate the standardization of measurements and timing. Here some of the application domains of UTC are listed; Earth and space sciences need precise timing for observation, research, and modelling in the fields of geodesy, geophysics and astronomy; telecommunications are based on precise network synchronization; telecommunication techniques allow UTC dissemination. UTC is the reference for financial market coordination and cross-border energy transmission. Global Navigation Satellite Systems (GNSS) are based on precise timing and are synchronized to UTC; civil time keeping, and legal times are based on UTC. From the metrological point of view UTC gives traceability through the NMI's to the users as illustrated in Figure 7¹⁰.

¹⁰ A.A.V.V., *CCTF WGMRA Guideline 9. CCTF criteria for obtaining traceability in time and frequency* (<https://www.bipm.org/utils/common/pdf/CC/CCTF/CCTF – WGMRA – Guideline 9.pdf>)

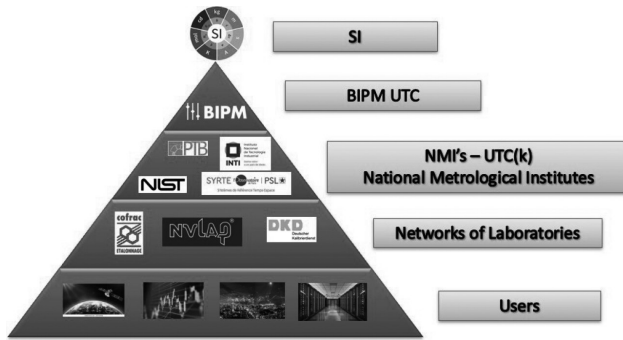


Figure 7. *The traceability chain of UTC.*

6. UTC – International and Universal

In this article UTC has been presented as international (internationally adopted) and universal (universally valid), but another extremely important concept is its being “natural”. With the atomic definition of the second on the one hand this “natural” aspect has been lost because the definition is no longer tied to the earth-sun cycles, but on the other hand the second has been made more universal in the sense that in any part of the universe the definition could be reproduced because it is not tied to a single earth phenomenon. In any part of the universe the second can thus be defined and not just on earth. However, the atomic definition is less natural because it requires a high level of technology and higher than that required by a definition based on astronomical observation (accessible even without modern technology, with degradation of accuracy). A distinction needs to be made, to avoid ambiguity about the concept of universality, between the definition of the second in term of frequency and in time. If we consider the definition of the second in terms of frequency the second can be reproduced in any part of the universe, when we consider UTC (a time quantity) we need to specify that it remains valid only on the gravitational equipotential surface corresponding to what is commonly known as sea level. Indeed, as relativity shows that time is a relative concept, no time scale can be described as universal. While the decisions related to the definition of UTC/TAI certainly have a political key, one of the phenomenotechnical reasons (cf. Bachelard) related to the decision to have a single reference time scale is related to the physics of the system. In fact, the noise characterizing atomic clocks is a Brownian motion and from mathematical theory it is known that two long-term Brownian motions diverge thus the need to have one as a reference (on which to steer the other time scales). Another point to be made is that the advent of information technology means that, for the moment, time is defined and realized by humans, but the process is speed up with the help of machines; with the advent of artificial intelligence’s it is not excluded that the algorithms needed to generate UTC can be completely realized by machines. To

finish there is certainly an important weight from the geopolitical point of view for the choices made regarding UTC by the BIPM since these choices favor technologies or infrastructures of some countries over others. An example are the definition of the unit of time (the technology to achieve it may be held in priority by certain countries rather than others) and the continuity of the scale (leap second) more or less compatible with different satellite navigation systems.

7. Conclusions

In this paper the definition and the calculation of UTC has been presented to highlight his international role as word reference in time. A big effort made by the time laboratories located all over the world, with the coordination of the BIPM, allows for years to have an international reference like UTC that shows high level metrological properties as long-term stability, accuracy and reliability. The BIPM thanks all the laboratories participating in UTC for their continues support and involvement. The general concept of universality has been dealt with in the document by emphasizing the difference between defining the second in terms of “frequency” and in terms of “time – time scale – UTC”, which gives rise to a completely different universality property for the second and UTC; from another point of view, it is also possible to say that UTC is universally used in many applications.

Gianna Panfilo
International Bureau of Weights and Measures (BIPM)
gpanfilo@bipm.org

Bibliography

- A.A.V.V., CCDS, “Metrologia”, Vol. 7, 1971, pp. 43-4.
 A.A. V.V., *13th General Conference on Weights and Measures*, Comptes Rendus de la 13e CGPM (1967/68), 1969, p.103.
 A.A.V.V., *13th CGPM*, “Metrologia”, Vol. 4, 1968, p. 43.
 A.A.V.V., *ITU-R Recommendations and Reports*, “TF Series. Recommendation ITU-R TF”, 2008, pp. 460-66.
 A.A. V.V., *26th CGPM Resolution 2* (<https://www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/26-2018/resolution-2>)
 Panfilo, G., “The Coordinated Universal Time”, *The IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, Special Issue on “Women Contributions”, Vol. 19, n°3, June 2016, p 28-33.
 Panfilo, G., Arias, F., *The Coordinated Universal Time (UTC)*, “Metrologia”, Vol. 56, n°4, 2019.
 Petit, G., Arias, F., Harmegnies, A., *et. al.*, “UTCr: a rapid realization of UTC”, *Metrologia*, Vol. 51, 2014, pp. 33-39.
 Petit, G., Arias, E.F., Panfilo, G., *International atomic time: status and future challenges*, “Comptes rendus Physique”, Vol. 16, n°5, 2015, pp. 480-488.

Clément Lacroûte

De la phénoménotechnique à l'idéologie matérialisée : pourquoi la science fabrique-t-elle le monde ?

Introduction

Je veux tenter ici de mettre en perspective les thèses de Gaston Bachelard (1884-1962) dans *Le nouvel esprit scientifique* (1934) et *La philosophie du non* (1940) pour répondre à la question : pourquoi la science fabrique-t-elle le monde ? Il s'agit donc de prendre au sérieux l'affirmation de Bachelard d'une science *réalisante*¹, et de la questionner depuis le XXI^e siècle. La science et la technologie semblent bien être à la source de notre environnement matériel. Une explication de cet état de choses peut être lue dans différentes approches marxiennes apparues dans la deuxième moitié du XX^e siècle, et je critiquerai ici la *phénoménotechnique* bachelardienne à travers les concepts d'*idéologie matérialisée* développé à partir des années soixante par Guy Debord² (1931-1994) et d'*abstractions réelles* dans la critique de la valeur-dissociation.

Un lien entre Debord et Bachelard a déjà été avancé³ à propos de *La poétique de l'espace*⁴, mise en relation avec la pratique de la *dérive* situationniste⁵. Je me concentrerai pour ma part sur la notion de phénoménotechnique à travers *Le nouvel esprit scientifique* et *La philosophie du non*. Le lien entre les deux auteurs, qui ne se sont probablement pas lus, est alors loin d'être évident.

Mon travail de chercheur dans le domaine de la métrologie des fréquences et des horloges atomiques m'a amené à m'interroger sur les aspects historiques, philosophiques et enfin sociaux de mon domaine de recherche. La grille de lecture que je propose ici est donc directement liée à la volonté d'inscrire le champ séparé de la recherche scientifique au sein de la société moderne prise dans sa globalité.

¹ Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, Puf, 2013.

² Debord, G., *La Société du Spectacle*, Paris, Gallimard, 1996.

³ Chasson, Y., « Ce que nous disent les textes situationnistes sur la psychogéographie », *FLAMME HS*, n°1, 2023, <https://doi.org/10.25965/flamm.663> (dernière consultation 13.10.2023)

⁴ Bachelard, G., *La poétique de l'espace*, Paris, Puf, 1957.

⁵ Debord, G., « Théorie de la dérive », *Les Lèvres nues*, 9, 1956, <https://www.larevuedesressources.org/theorie-de-la-derive,038.html> (dernière consultation 13.10.2023)

Dans ce contexte, les concepts debordien et marxien étant des outils extrêmement puissants, il m'a semblé intéressant d'interroger l'actualité du concept de phénomenotechnique à travers ce prisme.

La science fabrique le monde

Clément Lacroûte

Il est tout d'abord nécessaire de préciser ce que signifie l'affirmation que la science *fabrique* le monde. Un premier constat trivial s'effectue dans l'expérience quotidienne du monde occidental, et même de la quasi-totalité du monde habité. Notre environnement intègre d'innombrables réalisations techniques (automobiles, trains, routes, immeubles, éclairages publics, écrans, etc.) trouvant leurs racines dans les découvertes de la physique-chimie du XIX^e (moteurs thermiques, électricité, béton armé...), XX^e (LEDs, lasers, énergie nucléaire...) voire XXI^e (génomique, tourisme spatial, ...) siècle. La science fabrique ainsi notre monde, à travers l'esprit des ingénieurs et les mains des ouvriers, au sens le plus littéral du terme.

Mais le mot « fabrique » renvoie aussi aux lointaines manufactures, prémisses de l'ère industriel, notamment mises en place pour la production textile en pleine expansion. *Fabric*, en anglais, signifie d'ailleurs « tissu ». Et il est en effet possible d'affirmer que la science « fabrique » le monde au sens où elle en tisse la trame invisible et abstraite.

Avec le développement et la densification des réseaux de télécommunication, je peux connaître à tout instant mes propres coordonnées spatio-temporelles. Mon smartphone, ma tablette ou mon ordinateur me révéleront les trois grandeurs qui définissent ma place dans le monde : date (qui, techniquement, inclut jour et heure), latitude et longitude. Les systèmes GNSS (GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU, etc.) recouvrent la surface de la terre d'une trame géométrique invisible et abstraite. UTC, le temps universel coordonné, définit l'heure légale et le déroulement implacable et infini du temps, divisé en segments abstraits égaux entre eux. Il s'agit d'une trame spatio-temporelle *a priori*, une matrice au sein de laquelle nous agissons sans en avoir conscience, qui semble exister indépendamment de nous, et sur laquelle nous ne revenons que de manière réflexive ainsi que je le fais présentement.

Cette trame est bien une trame abstraite, au double sens où elle est *intangible* et résulte d'opérations scientifiques, mathématiques et techniques nombreuses et complexes. Mais cette trame abstraite est pourtant devenue sensible : le temps est vécu au quotidien à travers les chiffres de l'horloge, celle de notre téléphone, de notre ordinateur, de notre tablette, radio, téléviseur, etc. Même l'espace tend à devenir de plus en plus lié aux « maps », qui guident désormais les passants dans une ville inconnue, si bien qu'un trajet n'est plus une suite de repères fixes (il faut passer le pont, l'école cent mètres plus loin, et enfin prendre la troisième à droite) mais une ligne tracée sur une carte à deux dimensions. Le moyen le plus sûr d'indiquer un point de rendez-vous est devenu le jeu de coordonnées GPS, plutôt que l'adresse.

A contrario, c'est l'expérience auparavant sensible du temps qui est devenue abstraite : l'heure de l'horloge est fortement décorrélée de l'heure solaire, et le midi « vrai » (l'heure où l'ombre est la plus courte) peut être décalé de plusieurs heures du midi « juste » (celui de l'horloge). Connaître l'heure solaire demande de connaître l'équation qui la relie à l'heure de l'horloge au lieu où l'on se trouve, ou bien à la rechercher sur internet. On note donc ici une inversion entre le concret et l'abstrait : on se déplace d'abord au sein de la trame spatio-temporelle abstraite construite par les instituts nationaux de métrologie et les systèmes de géo-navigation par satellite, qui devient comme tangible, et on relie parfois cette trame aux éléments sensibles, en faisant une opération d'abstraction momentanée de la trame a priori.

On peut ainsi relever trois traits dans la manière dont la science fabrique aujourd'hui le monde : la fabrique matérielle du monde qui nous entoure ; la fabrique de la trame a priori au sein de laquelle nous évoluons ; et l'inversion concret-abstrait. Il faut noter que ces caractéristiques suivent un mouvement d'expansion : les téléviseurs sont passés du salon aux chambres à coucher puis dans la poche de tout un chacun ; la *couverture* promise par les réseaux de télécommunication est en constante expansion géographique ; la visite d'une grotte pré-historique ou la vue d'un tableau antique passera de plus en plus par la reproduction scientifique des originaux ; et l'innovation semble jugée positive dans tous les domaines.

La science réalisante de la phénoménotéchnique

Il s'agit maintenant d'examiner la phénoménotéchnique bachelardienne, en se basant sur *Le nouvel esprit scientifique* et *La philosophie du non*. Bachelard affirme en 1934, dans *Le nouvel esprit scientifique*, que « les instruments ne sont que des théories matérialisées. [...] l'activité scientifique moderne s'attache à construire un monde à l'image de la raison »⁶. En effet, dans l'environnement extrêmement contrôlé du laboratoire, rien ne doit être laissé au hasard : les conditions expérimentales doivent approcher aussi près que possible les hypothèses décrites par la théorie.

« Autrement dit, l'application de la pensée scientifique nous paraît essentiellement *réalisante* »⁷. Bachelard insiste sur le fait que la *réalité* du laboratoire est *construite*, construite *rationnellement* pour matérialiser la théorie mathématique. Et de préciser : « Les enseignements de la réalité ne valent qu'autant qu'ils suggèrent des réalisations rationnelles »⁸. Et en effet la réalité du laboratoire, les résultats expérimentaux, vont nourrir en retour la théorie qui va s'affiner et permettre de nouvelles réalisations rationnelles.

Cette nécessité pour la science de conduire à des réalisations concrètes, à construire le monde, est précisée et radicalisée dans *La philosophie du non* : « Ainsi la réalisation prime la réalité. Cette primauté de la réalisation décline la réalité. Un physicien ne

⁶ Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, Puf, 2013, p. 17.

⁷ *Ibidem*, p. 8.

⁸ *Ibidem*, p.13.

connaît vraiment une réalité que lorsqu'il l'a réalisée, quand il est maître de l'éternel recommencement des choses et qu'il constitue en lui un éternel retour de la raison. La théorie est la vérité mathématique qui n'a pas encore trouvé sa réalisation complète. [...] Il faut forcer la nature à aller aussi loin que notre esprit »⁹.

Il faut donc pour la science moderne s'atteler à des réalisations ; à construire un monde. Il s'agit bien là de fabrique matérielle, de réalisations bien concrètes. Mais que fabriquent exactement les scientifiques modernes ? « C'est dans le domaine mathématique que sont les sources de la pensée expérimentale contemporaine »¹⁰. « C'est là que se réalise l'équation du noumène et du phénomène et que le noumène révèle subitement ses impulsions techniques. [...] La pensée achève l'expérience »¹¹. Il ne fait aucun doute que pour Bachelard, le rationnel est essentiellement mathématique. Le noumène, qui est en quelque sorte le noyau de vérité, l'essence, du phénomène, est justement le cœur mathématique de la réalisation scientifique. Et « c'est la réalisation du rationnel dans l'expérience physique qu'il nous faudra dégager »¹².

Le monde que la science fabrique est l'expression phénoménale du noumène mathématique. Noumènes et phénomènes entrent dans un jeu dialectique, et c'est la tâche du scientifique de construire sans relâche les phénomènes qui lui permettront de réaliser dans son laboratoire le noumène, l'essence de sa connaissance nouvelle. Ainsi que Bachelard le développe dans *La philosophie du non*, ce n'est pas sans conséquence pour la « réalité sensible » naïve. « Il y a rupture entre la connaissance sensible et la connaissance scientifique »¹³ : la connaissance scientifique se nourrissant d'une réalité construite rationnellement, elle est essentiellement différente de la connaissance sensible immédiate. Dans ce cadre, ce sont les théories et les lois qui en découlent qui acquièrent un statut de réalité, et non les objets dans leur immédiateté : « il faut passer du réalisme des choses au réalisme des lois »¹⁴. La frontière entre le phénomène observé en laboratoire et la théorie mathématique est presque effacée : « métaphore mathématique et phénomène mesuré ne peuvent être distingués »¹⁵. Ce *réalisme des lois* semble s'étendre, au détour de certaines phrases, bien au-delà de l'espace du laboratoire : « La véritable solidarité du réel est d'essence mathématique »¹⁶. Pour Bachelard, il s'agit bien de rendre *concrète* dans les réalisations scientifiques la nature *abstraite*, mathématique, du monde. Bien que Bachelard prenne généralement soin de s'attacher à décrire le monde *des scientifiques*, il reste clair que ce monde se généralise finalement au réel, dont la solidarité (la cohérence, l'ordre) est mathématique. Bachelard observe donc, dans l'activité *réalisante* de la science moderne, ce mouvement d'inversion concret-abstrait qui conduit à rendre tangible l'essence abstraite des choses, et à déclasser

⁹ Bachelard, G., *La philosophie du non*, Paris, Puf, 1966, p.36.

¹⁰ Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, Puf, 2013, p. 138.

¹¹ *Ibidem*, p. 161.

¹² *Ibidem*, p. 8.

¹³ Bachelard, G., *La philosophie du non*, Paris, Puf, 1966, p. 10.

¹⁴ *Ibidem*, p.27.

¹⁵ *Ibidem*, p. 76.

¹⁶ *Ibidem*, p. 88.

l'expérience sensible du monde. Il faut souligner ici encore qu'aujourd'hui, la dimension *réalisante* de la science et de la technologie a un caractère d'évidence et touche une portion très élevée des terres et de la population, allant sans doute bien au-delà de ce que Bachelard pouvait imaginer ; dans la France des années 30, les réalisations de la science restaient encore circonscrites géographiquement et diffusées à un nombre de personnes très limité.

Gaston Bachelard se concentre, dans *Le nouvel esprit scientifique* et *La philosophie du non*, sur l'épistémologie, sur l'évolution de la raison des scientifiques et de leurs prédécesseurs. Il s'agit bien d'histoire et de philosophie des sciences, d'histoire de la philosophie des sciences, de l'évolution de l'esprit scientifique qui apparaît *après-coup* comme logique, et peut-être nécessaire. Si Bachelard présente le mouvement historique de *rationalisation* de l'esprit scientifique, et les étapes qui ont conduit à l'avènement du nouvel esprit scientifique, les causes de ce mouvement restent tacites, ou assez peu discutées. Au-delà du regard indéniablement positif posé par Bachelard sur les scientifiques, on trouve cependant quelques traces des causes de ce mouvement apparemment jugé comme nécessaire : « Qu'il y ait alors coïncidence entre la probabilité calculée et la probabilité mesurée, c'est peut-être la preuve la plus délicate, la plus subtile, la plus convaincante de la perméabilité de la nature pour la raison »¹⁷. Ici Bachelard avance une *preuve* de la perméabilité de la nature pour la raison, sans pour autant en expliciter tous les termes ; la raison (scientifique) serait la forme d'explication appropriée de la nature (le monde objectif, immédiat) ; mais cette perméabilité va au-delà de l'explication, et si la science est *réalisante*, et la nature *perméable* à la raison, on peut en conclure que la raison *pénètre* la nature, l'*intègre naturellement*. « La méthode cartésienne est réductive, elle n'est point inductive. Une telle réduction fausse l'analyse et entrave le développement extensif de la pensée objective. Or il n'y a pas de pensée objective, pas d'objectivation, sans cette extension »¹⁸. Ici Bachelard avance l'idée que la méthode inductive est celle qui correspond à la pensée objective, parce que la pensée objective nécessite un développement extensif. Cette fois il n'y a pas lieu d'avancer une preuve ou une justification : il s'agit bien d'une simple *nécessité*.

Ainsi la nature serait *perméable à la raison*, et il est ainsi naturel que la raison « infuse » la nature, qui a horreur du vide ; et par ailleurs le mouvement de la pensée rationnelle est un mouvement d'extension rendu nécessaire par la pensée objective, et qui ne doit pas être entravé. Dans *La philosophie du non*, Gaston Bachelard précise encore son propos : « nous avons adopté, pour les connaissances objectives particulières, l'ordre réalisme – empirisme – rationalisme. Cet ordre est génétique. Cet ordre prouve la réalité même de l'épistémologie »¹⁹. L'emploi du mot *génétique*, à propos des formes successives prises par l'esprit scientifique, ne peut être fortuit sous la plume d'un philosophe ayant une formation scientifique. On en déduira logiquement que si cet ordre est *génétique*, si le développement

¹⁷ Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, Puf, 2013, p. 122.

¹⁸ *Ibidem*, p. 142.

¹⁹ Bachelard, G., *La philosophie du non*, Paris, Puf, 1966, p. 48.

extensif de la pensée est *nécessaire*, c'est que cet ordre et ce développement sont pour ainsi dire inscrits dans l'ADN humain. On retrouve plus loin le vocabulaire de la biologie : « Pour que la connaissance ait toute son efficacité, il faut maintenant que l'esprit se transforme. [...] Les conditions mêmes de l'unité de la vie de l'esprit imposent une variation dans la vie de l'esprit, une mutation humaine profonde »²⁰. Les termes de « conditions [...] de l'unité de la vie » et de « mutation humaine profonde », bien qu'appliqués ici à l'esprit humain (implicitement l'esprit scientifique, bien que l'ambiguïté subsiste), convoquent de nouveau l'idée d'une évolution, et même d'une *loi de l'évolution*, qui n'est pas exprimée mais que l'utilisation du terme de *mutation* ne peut manquer de rappeler à un scientifique du début du XX^e siècle. Ici Bachelard laisse apparaître un point crucial : non seulement le développement du nouvel esprit scientifique serait *nécessaire*, mais cette nécessité serait d'ordre naturelle – génétique, même. Il me semble voir ici poindre, pour Bachelard, une justification naturaliste, voire ontologique, de la dynamique épistémologique qu'il a mise à jour.

Ce mouvement, naturel et nécessaire aux yeux de Bachelard, semble lié implicitement à un mouvement de conquête : « L'esprit scientifique ne peut se constituer qu'en détruisant l'esprit non-scientifique. [...] Tout réel progrès dans la pensée scientifique nécessite une conversion »²¹. Ici un mouvement subjectif de destruction-conversion est le moteur du développement de l'esprit scientifique ; le rationalisme doit succéder à l'empirisme et au réalisme, qui sont progressivement intégrés et complétés par le rationalisme. Ce mouvement subjectif est également objectivé par les expériences menées en laboratoire qui démentent les théories précédentes : « La généralisation par le nom 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 »²². Le jeu dialectique entre noumènes et phénomènes doit ainsi conduire à une extension permanente du domaine du rationnel. Ce mouvement qui est un mouvement objectif de négation de l'ancien par le nouveau (« l'expérience nouvelle dit *non* à l'expérience ancienne »²³) est en même temps un mouvement subjectif d'incorporation de l'ancien au nouveau (« La hiérarchie des notions se présente comme une extension progressive du domaine de la rationalité [...] La raison est donc bien une activité autonome qui tend à se compléter »²⁴) ; il nécessite une *conversion* (« le sens de l'évolution philosophique des notions scientifiques est si net qu'il faut conclure que la connaissance scientifique ordonne la pensée, que la science ordonne la philosophie elle-même »²⁵). Bien que Bachelard n'en fasse pas explicitement mention, le champ lexical même ne peut manquer d'évoquer par

²⁰ *Ibidem*, p. 143.

²¹ Bachelard, G., *La philosophie du non*, Paris, Puf, 1966, p. 8.

²² *Ibidem*, p. 137.

²³ *Ibidem*, p. 9.

²⁴ *Ibidem*, p. 33.

²⁵ *Ibidem*, p. 22. Ici il est clair que Bachelard mentionne l'ordre logique, ou rationnel, des notions scientifiques ; mais les quelques analogies religieuses qu'il utilise laissent planer l'idée d'une *ordination* de la philosophie par les sciences.

endroits les conquêtes coloniales occidentales. Nous verrons plus loin que ça n'a rien de surprenant, si l'on considère qu'un même *sujet* préside au mouvement historique de la société capitaliste, dans ses aspects scientifiques comme dans ses aspects militaires et économiques.

La lecture de Marx comme base d'une critique catégorielle de la marchandise, du travail, de la valeur

Quel regard porter aujourd'hui sur le nouvel esprit scientifique ? Père de l'épistémologie historique, Gaston Bachelard a décrit avec une acuité rare le travail de l'esprit même des scientifiques modernes. Ses considérations l'ont conduit à produire des intuitions justes au sujet des domaines à la pointe de la physique et de la chimie de son temps, dans des ouvrages non de physique ou de chimie, mais de philosophie. Une école française d'épistémologie, reliant Bachelard à Latour en passant par Canguilhem (élève de Bachelard) et Foucault (élève de Canguilhem), a même été à la source d'une critique de la société moderne donnant une place centrale à la science et à la technologie.

Il est important d'interroger tout à la fois les limites et les possibles généralisations de la pensée épistémologique de Bachelard aujourd'hui. La limite la plus immédiatement visible est l'attitude éminemment positive de Bachelard vis-à-vis des sciences dites dures. Affirmer qu'« il faut forcer la nature à aller aussi loin que notre esprit » serait aujourd'hui tout simplement irrecevable, à moins d'adhérer aux projets cybernétiques d'humanité augmentée. Par ailleurs il apparaît tout à la fois juste de généraliser à la société tout entière ce que Bachelard attribuait en 1934 aux seuls scientifiques. Les scientifiques sont aujourd'hui poussés activement à la conversion des non-scientifiques, en conditionnant par exemple l'accès aux financements à la réalisation d'actions de diffusion de la « culture scientifique, technique et industrielle », et l'esprit scientifique au XXI^e siècle entend diffuser ainsi la vérité de la raison vers la société. Il est tout à fait notable que, durant la crise sanitaire, des scientifiques discutèrent à la télévision courbes, données statistiques et méthodologie dans le cadre de la communication officielle du gouvernement, tel un nouveau clergé. Au vu des crises écologiques et des nombreuses catastrophes liées à la physique-chimie (essais et accidents nucléaire, Seveso, etc.), au vu de la pollution, de la destruction des habitats naturels, de l'épuisement des ressources, il semble clair que la clairvoyance de Bachelard manquait d'une dimension critique.

La science fabrique le monde ; mais *quel* monde, pour *qui* et pour *quoi* ?

Les thèmes d'inversion concret-abstrait, d'abstraction matérialisée et de dynamique d'extension permanente qui inclut tout en niant renvoient à la critique catégorielle marxienne. Plusieurs courants critiques détachés du marxisme orthodoxe ont en effet prolongé les travaux de Marx autour des catégories centrales que sont la valeur, la marchandise, le travail abstrait, en se détachant plus ou moins de la centralité de la lutte des classes ou de la propriété des moyens de production qui occupent le communisme de parti.

Parmi ces approches, diverses et distinctes, on peut citer l'école de Francfort et les travaux de Adorno et Orkheimer ou Alfred Sohn-Retel ; les travaux de Guy Debord et d'une partie des situationnistes ; les universitaires Henri Lefebvre ou Jean-Marie Vincent en France et Moishe Postone au Canada ; ou encore le courant de la critique de la valeur-dissociation représenté en Allemagne par les groupes *Krisis* et *Exit !* et en France par les éditions *Crise et Critique*. Un point commun de ces approches nourries notamment du *Capital*, des *manuscripts économique-philosophiques de 1844* et des *Grundrisse* (travaux préparatoires à la rédaction du *Capital*), est la centralité de la marchandise et du procès de *production* (là où le « socialisme réel » s'était appliqué à changer la sphère de la circulation).

Pour résumer à grands traits, au sein de la société capitaliste, les marchandises n'existent au fond que comme porteuses de valeur. Un capital est investi dans la production d'une marchandise, afin que celle-ci permette d'engranger un capital plus important. La valeur est reliée au travail, à une dépense d'énergie humaine quantifiée via le temps de travail. Un capital est investi dans un travail humain, qui produit des marchandises portant une valeur, et la vente de ces marchandises permet d'engendrer une survaleur qui va augmenter le capital initial. Les marchandises sont donc des objets (aujourd'hui réels ou virtuels) qui portent une forme particulière de lien social : on vend sa force de travail pour subvenir à ses besoins, on satisfait ses besoins par l'acquisition de marchandises. Le travail est à la fois le carburant du système capitaliste (seule source de production de valeur pour les pionniers de l'économie politique tels Adam Smith ou David Ricardo, que Marx critique) et la mesure des êtres humains dans ce système. Le travail vu comme une dépense indifférenciée d'énergie humaine est une spécificité du système capitaliste qui se généralise à l'ère moderne, qu'on ne retrouve dans aucune autre forme d'organisation humaine, et que Marx nomme le *travail abstrait*.

Je vais me concentrer dans la suite sur deux approches complémentaires, celle de *spectacle* de Guy Debord et celle de la *critique de la valeur-dissociation*, afin d'examiner si, pour ces théories, la science fabrique le monde, et pourquoi.

L'idéologie matérialisée de la société du spectacle

Il est ici nécessaire, avant d'introduire la position de Guy Debord sur la science moderne et l'*idéologie matérialisée*, de revenir sur le concept de *spectacle*. Le parcours singulier de Guy Debord l'a amené à participer à diverses aventures, allant des avant-gardes artistiques (*Internationale Lettriste*, revue surréaliste *Les Lèvres nues*) à la « gauche radicale » (Socialisme ou barbarie) en passant par le cinéma – *contre le cinéma*. Son principal effort théorique s'est concrétisé dans la notion de *spectacle*, développée pleinement en 1967 dans *La Société du Spectacle* puis dans les *Commentaires sur la Société du Spectacle* de 1988.

Citons ici quelques thèses extraites de *La Société du Spectacle* :

Le spectacle « n'est rien d'autre que l'économie se développant pour elle-même ; le spectacle est le *capital* à un tel degré d'accumulation qu'il devient image. Toute la vie

des sociétés dans lesquelles règnent les conditions modernes de production s'annonce comme une immense accumulation de spectacles. Tout ce qui était directement vécu s'est éloigné dans une représentation ».²⁶

« Le spectacle n'est pas un ensemble d'images, mais un rapport social entre des personnes, médiatisé par des images ; c'est le moment où la marchandise est parvenue à l'occupation totale de la vie sociale : la scission achevée à l'intérieur de l'homme »²⁷.

On peut résumer de manière succincte le développement du capitalisme jusqu'à la forme du spectacle : le mouvement de développement mondial du capitalisme a conduit à une séparation de la sphère économique des autres sphères d'activités humaines ; la sphère économique a vite entièrement subordonné toutes les autres, et la société toute entière a fini par se confondre avec le mouvement autonome de l'économie se développant pour elle-même ; l'essence de l'économie autonomisée se loge dans la marchandise et la valeur d'échange, qui a triomphé de la valeur d'usage et a rendu l'usage réel superflu.

Ainsi les marchandises que l'on s'échange dans l'économie capitaliste ne sont au fond que des images, des représentations de la réalité qu'elles recouvraient auparavant en tant que simples objets. Et la domination de la sphère économique sur toutes les autres implique que c'est toute la vie de ces sociétés qui s'est éloignée dans une représentation. Le concept de spectacle recouvre donc à la fois le dernier stade de développement de l'économie capitaliste, l'ensemble des productions du capital, et le lien social autorisé entre les producteurs/consommateurs ; c'est pour quoi il est impossible de donner une définition univoque du spectacle.

Dans le contexte du spectacle, le rôle des idéologies se voit transformé :

« La part même de travail proprement idéologique au service du système ne se conçoit plus qu'en tant que reconnaissance d'un « socle épistémologique » qui se veut au-delà de tout phénomène idéologique. L'idéologie matérialisée est elle-même sans nom, comme elle est sans programme historique énonçable »²⁸.

« Les faits idéologiques n'ont jamais été de simples chimères, mais la conscience déformée des réalités, et en tant que tels des facteurs réels exerçant en retour une réelle action déformante ; d'autant plus la *matérialisation* de l'idéologie qu'entraîne la réussite concrète de la production économique autonomisée, dans la forme du spectacle, confond pratiquement avec la réalité sociale une idéologie qui a pu retoucher le réel sur son modèle »²⁹.

Ici Debord insiste sur le fait que le spectacle, l'idéologie ultime, n'est qu'un simple « socle idéologique », une matrice indiscutable, dans laquelle évoluent les spectateurs. L'idéologie spectaculaire ne s'écrit pas, ne s'énonce pas, elle « bâtit

²⁶ Debord, G., *La Société du Spectacle*, Paris, Gallimard, 1996 ; phrases extraites des thèses 16, 34, 1 réunies en un même paragraphe.

²⁷ *Ibidem*, thèses 4, 40, 20.

²⁸ Debord, G., *La Société du Spectacle*, Paris, Gallimard, 1996, thèse 213.

²⁹ *Ibidem*, thèse 212.

son monde ». L'idéologie, d'abstraite, est devenue concrète, tandis que la « vie réelle » est devenue abstraite, éloignée dans une représentation.

Entre 1967 et 1988, Debord a pu constater les ravages écologiques causés par le capitalisme, divers « incidents » industriels, et la catastrophe de Tchernobyl. Il précise alors dans les *Commentaires sur la Société du Spectacle* le rôle de la science dans le spectacle : « On ne demande plus à la science de comprendre le monde, ou d'y améliorer quelque chose. On lui demande de justifier instantanément ce qui se fait »³⁰. « Tout ce que l'on peut faire doit être fait. C'est dire que tout nouvel instrument doit être employé, quoi qu'il en coûte. L'outillage nouveau devient partout le but et le moteur du système [...] »³¹ « Car le sens final du spectaculaire intégré, c'est qu'il s'est intégré dans la réalité même à mesure qu'il en parlait ; et qu'il la reconstruisait comme il en parlait »³². Pour Debord, c'est le spectacle, le mouvement autonome global du capital, qui est *réalisant*. À la veille de la chute du mur de Berlin, Debord observe que les formes du capitalisme de l'est (bureaucratique) et de l'ouest (diffus) ont fusionné en un seul et même *spectaculaire intégré*.

Dans ce cadre, la science fabrique la matrice matérielle conditionnant tout lien social tout en étant à la source du développement technologique permanent nécessaire à la dynamique spectaculaire. C'est en même temps une caution morale du système, avec les experts chargés de divulguer la vérité officielle du moment (comme l'a si bien illustré la catastrophe de Tchernobyl). Dans la vision de Guy Debord, la science fabrique le monde avec le seul et unique but de maintenir et étendre la domination spectaculaire.

Critique de la valeur et *abstractions réelles*

L'analyse de Guy Debord reste marquée, de par ses influences comme sa situation historique, par des éléments appartenant au marxisme traditionnel, de luttes des classes ou de prolétariat émancipateur. La science moderne aurait été « pervertie » par le spectacle, et Debord met explicitement en balance, dans les *Commentaires sur la Société du Spectacle*, les scientifiques du XIX^e siècle, luttant contre les épidémies mortelles, et ceux du XX^e, dissimulant la propagation du nuage radioactif sous un jargon trompeur, ou laissant se propager le virus de sida qui touche des populations « marginales » (il y fait allusion dans le film *Guy Debord, Son Art et Son Temps*). Il faut rappeler que Debord n'a commencé à intégrer les questions touchant à l'environnement qu'à partir des années 70³³, les lettristes puis situationnistes ayant initialement abordé la question de la science et de la technique à travers leur potentiel libérateur, loin des positions anti-industrielles qui seront prises par certains membres beaucoup plus tard. La question du sujet

³⁰ Debord, G., *Commentaires sur la Société du Spectacle*, Paris, Gallimard, 1992, p. 59.

³¹ *Ibidem*, p. 106.

³² *Ibidem*, p. 22.

³³ Debord, G., *La planète Malade*, Paris, Gallimard, 2004 (texte inédit de 1971). Debord, G. et Sanguinetti, G., *La véritable scission dans l'Internationale*, Paris, Fayard, 1998 (parution initiale 1972).

de la connaissance, du sujet scientifique moderne, dont l'archétype commence à se construire bien avant le XIX^e siècle, et le lien de consanguinité entre science moderne et capitalisme, sont donc laissées de côté.

L'approche catégorielle développée dans le cadre de la Critique de la valeur-dissociation (CVD) permet de confronter directement ce point épineux. La place manque ici pour développer pleinement l'histoire et les tendances de ce mouvement critique, c'est pourquoi je me contenterai d'en résumer les thèses principales³⁴. La CVD aborde le capitalisme comme un fait social global, dont le long développement a débuté au Moyen-Âge (sans consensus sur le moment précis, par exemple l'apparition des armes à feu ou la naissance des états modernes...). Le fonctionnement de la société capitaliste est directement lié aux catégories de base que sont la valeur, la marchandise, le travail abstrait, l'argent, l'état. La totalité est par ailleurs une « totalité brisée », scindée par la distinction entre les sujets producteurs de valeur, membres de droit de la société, et celles et ceux qui en sont dissociées. Cette dissociation est d'abord une dissociation des genres, les sujets mâles étant chargés du travail et de la production de valeur, et les femmes héritant de la reproduction de la société, nécessaire à son fonctionnement mais sans valeur marchande.

Un thème central de la CVD est donc le « travail abstrait » : ce trait spécifiquement moderne désigne le fait que toute dépense d'énergie humaine est regroupée sous le terme de « travail », en faisant abstraction de toute spécificité de cette activité, du moment qu'elle produit une marchandise. L'auto-mouvement du capitalisme se résume dans la formule A-M-A' : de l'argent A permet la production de marchandises M, dont la vente permet l'obtention d'encore plus d'argent A'. Dans ce mouvement, l'argent rémunère un travail, et cette dépense d'énergie abstraite se trouve « cristallisée » dans la marchandise, qui lors de sa vente permettra la création de valeur.

Les marchandises sont ainsi les porteuses concrètes du travail abstrait, et mises en équivalence par leur dénominateur commun. La « mesure » de la valeur n'est pas une mesure directe d'énergie, mais la mesure du temps de travail. L'augmentation de la masse globale de valeur provient de la différence entre la valeur du travail salarié (le coût de la reproduction, la somme devant être versée au travailleur afin qu'il assure sa survie) et celle du produit sur le marché.

La survaleur était initialement – au XIX^e siècle – augmentée *via* l'augmentation pure et simple du temps de travail, mais celle-ci était doublement limitée, par la durée de la journée et la physiologie humaine. S'est alors amorcée une course à la productivité : si je suis capable de produire en une heure deux fois plus de marchandises que mes concurrents, je pourrai augmenter mes bénéfices.

Ici s'esquissent déjà les deux manières dont la marchandise et l'auto-mouvement du capital façonnent le monde : le rôle central de la mesure du temps de travail a impliqué une nouvelle façon d'être au monde, un nouvel espace-temps refaçonné

³⁴ On pourra se référer utilement aux ouvrages suivants pour plus de détails : Groupe Krisis, *Manifeste contre le travail*, Albi, Éditions Crise et Critique, 2020 ; Jappe, A., *Les aventures de la marchandise*, Paris, La Découverte, 2017 ; Jappe, A., *Sous le soleil noir du capital*, Albi, Crise et Critique, 2021.

pour les besoins de la production (temps) et la circulation (espace) des marchandises. Par ailleurs, l'augmentation de la productivité s'est faite et se fait encore par des moyens techniques ; de nouvelles machines permettent de créer de plus en plus de marchandises, de nouveaux marchés sont ouverts par l'invention de nouvelles marchandises, et cette nouveauté – commandée par l'impératif abstrait de création de valeur – est bien de nature matérielle, avec des répercussions organisationnelles et sociales liées à chaque reconfiguration de l'appareil de production.

Ainsi la lente transformation du monde par la socialisation par la valeur s'est faite de concert avec la naissance de la science moderne, de ses catégories abstraites, de sa distinction entre sujet et objet héritée de la philosophie et érigée en principe, et de ses possibilités techniques mises au service de l'augmentation de productivité et de l'innovation. Les formes phénoménales (la marchandise, l'argent) sont porteuses d'essences abstraites (le travail abstrait, la valeur), et le capitalisme est porteur d'une dynamique interne liée à la nécessité impérieuse d'augmenter la masse de valeur. Cette dynamique d'expansion est *négative*, notamment au sens où toute activité humaine potentiellement source de valeur sera niée dans ses qualités et ramenée à une pure quantité de travail abstrait, permettant seule la mise en équivalence avec d'autres marchandises. C'est également une dynamique intrinsèquement contradictoire, qui vise à diminuer la quantité de travail nécessaire via l'innovation technologique pour maximiser la survaleur tout en créant malgré tout de la valeur directement liée à la quantité de travail abstrait. Cette dynamique se fait « dans le dos » des acteurs et il en résulte un mouvement autonomisé, de ce que Marx a baptisé le « sujet automate ».

Citons ici deux brefs extraits de *La société autophage*, d'Anselm Jappe, ayant trait à notre sujet : « Marx a défini la marchandise comme « sensible – suprasensible. » Elle est un mélange de matériel et d'idéal avec suprématie de l'idéal. [...] la dimension suprasensible, métaphysique, de l'existence sociale, [...] est maintenant présente dans les moindres objets et actes de la vie quotidienne. C'est le monde réellement inversé, dont la dialectique hégélienne est la description adéquate [...] »³⁵ L'idée d'un monde « réellement inversé » est déjà présente chez Debord, sous la forme d'une inversion du *vrai* et du *faux*, où le vrai se réfère à la réalité matérielle immédiate, à la vie « réellement vécue », et le faux au monde reconstruit par et pour la domination spectaculaire³⁶. Ici le sens de cette inversion se précise : les marchandises sont *d'abord abstraites* – leur forme phénoménale n'est là que pour « porter » cette essence abstraite. « Le capitalisme est inséparable de la grande industrie, valeur et technologie vont ensemble – ce sont deux formes de déterminisme et de fétichisme »³⁷. La CVD reprend le terme marxien de « fétichisme » au sens où l'agir des sujets sociaux est conditionné *inconsciemment* par l'impératif des catégories de base du capitalisme et de la production de valeur. Ces

³⁵ Jappe, A., *La société autophage*, Paris, La Découverte, 2019.

³⁶ Je ne rentrerai pas ici dans les interrogations que peuvent susciter cette notion problématique de « vrai » ; elle touche notamment au statut d'une réalité immédiate qui aurait existé avant le déploiement de la domination spectaculaire.

³⁷ *Ibidem*.

impératifs sont constitués socialement par les êtres humains, mais leur semblent s'exercer tels des formes autonomes. Par ailleurs, il est peut-être important de préciser que pour notre propos, science et technologie sont pratiquement indissociables. Les développements des ingénieurs sont nourris des travaux des chercheurs ; les chercheurs sont encouragés inlassablement à favoriser de nouveaux développements technologiques et à induire des retombées économiques, et se placent même aujourd'hui à l'initiative de ce mouvement.

On retrouve ainsi les trois traits mis à jour dans l'analyse de Bachelard du travail scientifique : une science *réalisante*, une inversion concret-abstrait, une dynamique d'expansion. Mais là où Bachelard semble voir une nécessité ontologique, la critique catégorielle décèle au contraire le mouvement historiquement spécifique d'un sujet bien particulier, qui ne résulte aucunement d'un « progrès nécessaire » mais bien plutôt d'un mouvement totalisant. Dans le livre *Gris est l'arbre de la vie, verte est la théorie*, Robert Kurz analyse en détail le lien théorie-pratique dans la modernité, et le rôle possible de la critique. « La théorie sociale bourgeoise en tant que « science interprétative » est ainsi idéologique en soi, parce qu'elle ne peut être qu'une affirmation théorique scientifique ou une critique affirmative, comme reproduction de l'ontologie capitaliste présupposée et du traitement de la contradiction »³⁸. Ici, « l'ontologie capitaliste présupposée » désigne les catégories du système capitaliste et les impératifs sociaux qui leur sont associés, qui conditionnent *a priori* l'agir (qu'il soit pratique ou théorique) dans notre société. Pour Kurz, une théorie qui ne remonte pas à ces catégories est affirmative au sens où elle les pré-suppose, et donc les accepte. Le « traitement de la contradiction » désigne la manière dont sont traitées théoriquement les contradictions inhérentes à la dynamique capitaliste³⁹. « Le capitalisme peut être ainsi effectivement compris comme une interprétation-réelle de l'existence [...] La forme-théorie se transforme ainsi en même temps en « fournisseur » idéal de la pratique capitaliste, livrant une interprétation-réelle permanente tant du monde en général que du capitalisme lui-même dans son développement progressif. Sciences naturelles et théories sociales fournissent, du fait de leur caractère constitutif, des modèles d'interprétation pour le modelage pratique des conditions dominantes [...] »⁴⁰. Ici Kurz prolonge l'idée contenue dans le fait qu'agir théorique et pratique sont également conditionnés par les catégories de base capitalistes. Le monde est à la fois rebâti concrètement par la socialisation par la valeur, mais il est

³⁸ Kurz, R., *Gris est l'arbre de la vie, verte est la théorie*, Albi, Crise et Critique, 2020.

³⁹ Un exemple est la « lutte des classes », qui perd dans la CVD tout caractère fondamental ou essentiel : pour se développer, le capitalisme a dû mobiliser une « classe » de travailleurs susceptibles de produire de la valeur, c'est-à-dire de travailler. Mais ce travail, pour générer la plus grande part possible de survaleur, devait être rémunéré au niveau le plus bas possible. D'un autre côté, l'organisation marchande nécessite sur le plan légal une société de propriétaires égaux en droits sur le marché. Les « propriétaires de leur propre force de travail » ont donc incarné la tension entre, d'un côté, la classe prolétarienne exploitée par la classe bourgeoise pour générer la survaleur nécessaire à la dynamique capitaliste, et de l'autre la nécessité de constituer une société de propriétaires égaux sur le plan juridique, et donc l'intégration des « prolétaires » comme égaux *en droit* à leurs « exploités ».

⁴⁰ *Ibidem*.

en même temps décrit et remodelée par elle à travers le travail qualifié de théorique, que Kurz nomme « interprétation-réelle » de par l'action concrète qu'il suscite. « Ce qui est « déterminant », c'est plutôt la matrice a priori de la métaphysique-réelle moderne, et ses rapports formels, qui sous-tend tout agir dans le capitalisme, y compris son traitement immanent de la contradiction, son interprétation de la réalité et la transformation du monde qu'elle induit »⁴¹.

On voit bien ici que les théories scientifiques et sociales ont, selon Robert Kurz, maille à partir avec la justification idéologique en actes de l'ontologie capitaliste, et du traitement des contradictions internes de la société capitaliste. Ces traitements théoriques, qui façonnent et re-façonnent le réel, ne sont jamais qu'*affirmatifs*, puisqu'ils présupposent et acceptent la matrice a priori formée par les catégories de base que sont la valeur-dissociation et le travail abstrait. On peut voir aujourd'hui la théorie bachelardienne sous cet angle, théorie qui suppose une justification « génétique » à l'histoire de l'épistémologie, et reste aveugle au mouvement d'expansion négative du *sujet automate*.

Sous la perspective proposée par Robert Kurz, la science et la théorie en général acquièrent une fonction légitimatrice tant qu'elles ne remontent à la matrice a priori, aux catégories de base du capitalisme qui sous-tendent tout agir, qu'il soit pratique ou théorique. Cette légitimation est à la fois morale et concrète, c'est une transformation du monde.

Conclusion

Paru en 1934 dans une France encore essentiellement paysanne, *Le nouvel esprit scientifique* met à jour avec une acuité surprenante les modes de raisonnement et les conduites expérimentales caractéristiques de la science moderne. Pour qui connaît le fonctionnement d'un laboratoire de recherche, la justesse de cette description est évidente, et reste pertinente aujourd'hui. Le jeu dialectique entre théorie et expérience, les avancées par rupture épistémologique, la nécessité de *réaliser* pour comprendre ont intégré l'inconscient des scientifiques – en témoigne la phrase inscrite au tableau de Richard Feynmann⁴² : « What I cannot create, I do not understand » (« ce que je ne peux créer, je ne le comprends pas »).

Mais l'aspect *réalisant* de la science s'est propagé à quasiment tous les aspects de la vie depuis 1934. Le mouvement d'extension permanente, l'essence abstraite de notre environnement concret, le travail théorique conduisant à reconstruire encore et encore le monde selon ses besoins, rappellent la totalité capitaliste décrite par différentes approches marxiennes centrées sur la valeur ; Bachelard semble voir une nécessité ontologique au développement de la connaissance, et une valeur d'exemple dans la dialectique de la « philosophie du non », là où la critique de la

⁴¹ *Ibidem*.

⁴² R. P. Feynman (1918-1988), physicien américain connu pour ses travaux en physique théorique, notamment en électrodynamique quantique et en physique des particules pour lesquels il obtint prix Nobel de Physique de 1965 avec Sin-Itiro Tomonaga et Julian Schwinger.

valeur-dissociation décèle le mouvement tautologique du « sujet automate » visant à créer toujours plus de valeur abstraite ; Bachelard reste dans le cadre de ce que Kurz nomme une théorie « interprétative-réelle ». La critique de la valeur voit dans la science à la fois un moteur du développement technologique nécessaire à l'accroissement de valeur, et une fonction légitimatrice de la dynamique capitalise. Ces caractères ne sont ni « naturels » ni ontologiques, mais dérivent de la matrice a priori qu'il s'agit de remettre en question, en théorie comme en pratique.

Clément Lacroûte
Institute FEMTO-ST-Besançon
clement.lacroute@femto-st.fr

Bibliographie

- Bachelard, G., *La poétique de l'espace*, Paris, Puf, 1957. Bachelard, G., *Le nouvel esprit scientifique*, Paris, Puf, 2013. Bachelard, G., *La philosophie du non*, Paris, Puf, 1966.
- Chasson, Y., « Ce que nous disent les textes situationnistes sur la psychogéographie », *FLAMME HS*, n°1, 2023, <https://doi.org/10.25965/flammme.663> (dernière consultation 13.10.2023)
- Debord, G., « Théorie de la dérive », *Les Lèvres nues*, 9, 1956, <https://www.larevuedesressources.org/theorie-de-la-derive,038.html> (dernière consultation 13.10.2023)
- Debord, G., *Commentaires sur la Société du Spectacle*, Paris, Gallimard, 1992. Debord, G., *La Société du Spectacle*, Paris, Gallimard, 1996.
- Debord, G., *La planète Malade*, Paris, Gallimard, 2004.
- Debord, G. et Sanguinetti, G., *La véritable scission dans l'Internationale*, Paris, Fayard, 1998.
- Groupe Krisis, *Manifeste contre le travail*, Albi, Éditions Crise et Critique, 2020.
- Jappe, A., *Les aventures de la marchandise*, Paris, La Découverte, 2017. Jappe, A., *Sous le soleil noir du capital*, Albi, Crise et Critique, 2021.
- Jappe, A., *La société autophage*, Paris, La Découverte, 2019.
- Kurz, R., *Gris est l'arbre de la vie, verte est la théorie*, Albi, Crise et Critique, 2020.

Sarah Carvallo, François Vernotte

Bibliographie générale : La phénoménotechnique du temps

- Adler, K. *Mesurer le monde*. Paris, Flammarion, 2015.
- Alunni, C. Gaston bachelard face aux mathématiques. *Revue de synthèse*, 2015, 136:9-32.
- Alunni, Ch. *Spectres de Bachelard*, Paris, Hermann, 2019.
- Auclair, R. Les mesures du temps. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 2003, 97(2):54-60.
- Baron, S. Miller, K. *An Introduction to the Philosophy of Time*. Cambridge: Polity Press, 2019.
- Bitbol, M., Gayon J. (dir.), *L'épistémologie française. 1830-1970*, Paris, Éditions matériologiques, 2015
- Bontems, V. Causalité historique et contemporanéité relative: de la relativité einsteinienne aux sciences historiques. *Revue de synthèse*, 2014, 135(6/1):71– 89.
- Bontems, V. L'actualité de l'épistémologie historique, *Revue d'histoire des sciences*, 59/1, janvier-juin 2006, p. 137-147.
- Bontems, V., (dir.), *Bachelard et l'avenir de la culture. Du surrationalisme à la raison créative*, Paris, Presses des Mines, 2018.
- Bouton, C., Huneman, P., *Temps de la nature, nature du temps. Études philosophiques sur le temps dans les sciences naturelles*, Paris, CNRS éditions, 2018.
- Braddon-Mitchell, D. 'Comment savons-nous que c'est maintenant maintenant?', in *Philosophie du temps*. J. Benovsky (ed.), Genève: La Baconnière, 2017, 305-314.
- Braunstein, Jean-François (dir.) ; Moya Diez, Iván (dir.) ; Vagelli, Matteo (dir.). *L'épistémologie historique : Histoire et méthodes*. Nouvelle édition [en ligne]. Paris : Éditions de la Sorbonne, 2019 (généré le 19 décembre 2019).
- Braunstein, Jean-François, P. Schöttler, H. Schmidgen (dir.), *Epistemology and History. From Bachelard and Canguilhem to Today's History of Science*, Berlin, Max Planck Institut für Wissenschaftsgeschichte, 2012.
- Callender, C. (ed.), *The Oxford Handbook of Philosophy of Time*. Oxford: Oxford University Press, 2011.
- Chimisso, Cristina, *Gaston Bachelard: Critic of Science and the Imagination*. London: Routledge, 2001.
- Cohen-Tannoudji, G. Le temps des processus élémentaires. In Étienne Klein, Michel Spiro (éds.) : *Le temps et sa flèche*, Paris, Flammarion, 1996.
- Crosby, A. *La mesure de la réalité*. [1996] Paris, Allia, 2003.
- Cutler, Leonard S. Fifty years of commercial caesium clocks. *Metrologia* 2005, 42(3), S90.
- Daston, L. et Galison, P. *Objectivité*. [2007] Les presses du réel, Dijon, 2012.
- Declos, A., Tiercelin, Cl. (éds.) *La métaphysique du temps. Perspectives contemporaines*, Paris, Collège de France, 2021.
- During, E. Survoler le temps : l'espace-temps comme schème, mythe et thème. *Revue de métaphysique et de morale*. 2020/3 N° 107, p. 347-364.
- During, E. Préface. Gaston Bachelard. *La dialectique de la durée*. Paris, PUF, 2022.
- During, E. Time as form. Lessons from the Bergson-Einstein Dispute. In: A. Campo, R. Ronchi, *The Quarrel of time: Bergson vs. Einstein*. De Gruyter, 2021, p. 99-134.

- Dieks, D. Special relativity and the flow of time. *Philosophy of science*, 1988, 55(3):456-460.
- Guinot, B., Arias, E.F. Atomic time-keeping from 1955 to the present. *Metrologia* 2005, 42(3), S20-S30.
- Gupta, S.V. *Past, present and future international system of units*. Springer, 2010.
- Hakim, R. *Gravitation relativiste*. Paris, EDPSciences/CNRS Éditions, 2001.
- Hartle, J. et Hawking, S. (1983). Wave function of the universe. *Physical Review D*, 28(12):2960-2975.
- Fabry, L., *Phénoménotechnique: Bachelard's Critical Inheritance of Conventionalism. Studies in History and Philosophy of Science*, Part A, Elsevier, 2019, p. 34-42.
- Fabry, L. "past/present" : Bachelard, Gaston, "la philosophie dialoguée". *Philosophical Inquiries*, 2021, 9(1):211-230.
- Grandjean, V. 'How is the Asymmetry between the Open Future and the Fixed Past to be characterized?', in *Synthese*. 2021, Vol. 198, pp. 1863-1886.
- Grandjean, V. *Le Futur ouvert*. Paris, Hermann, 2024.
- Grandjean, V. 'The Bare Past', in *Philosophia*. 2022, Vol. 50, pp. 2523-2550.
- Grandjean, V. *The Asymmetric Nature of Time*. Springer Nature, 2022.
- Jappe, A., *Sous le soleil noir du capital*, Albi, Crise et Critique, 2021.
- Jappe, A., *La société autophage*, Paris, La Découverte, 2019.
- Jedrzejewski, F. *Histoire universelle de la mesure*. Paris, Ellipses, 2002.
- Landes, D. S. *L'heure qu'il est*. Paris, Les belles lettres, 2017.
- Le Bihan, Baptiste. *Qu'est-ce que le temps?* Paris, Vrin, 2019.
- Le Bihan, B., Huggett, N., Wüthrich, Ch. *Philosophy beyond spacetime*. Oxford: Oxford University Press, 2021.
- Le Bihan, B. From spacetime to Space and Time: a reply to Markosian, *Analysis* 80 (3): 456-462, 2020.
- Le Bihan, Baptiste, Baron, S. 'Causal Theories of Spacetime', *Noûs*, 2024, 58 (1), 202-224.
- Le Bihan, B., Baron, S. 'Trouble on the Horizon for Presentism', *Philosophers' Imprint* 2023, 23 (1): 2
- Le Bihan, B., 'Spacetime emergence in Quantum Gravity: Functionalism and the Hard Problem', *Synthese*, 2021, 199 (2), 371-393.
- Leschiutta, S. The definition of the 'atomic' second. *Metrologia* 2005, 42(3), S10-S19.
- Loison, L. 'Forms of Presentism in the History of Science: Rethinking the Project of Historical Epistemology', *Studies in History and Philosophy of Science*, 60 (2016), 29-37.
- Maldacena, J. et Susskind, L. Cool horizons for entangled black holes. *Fortschritte der Physik*, 2013, 61(9):781-811.
- Norman F. Ramsey, History of early atomic clocks. *Metrologia* 2005, 42(3), S1-3.
- Panfilò, G. Arias, F. The Coordinated Universal Time(UTC), *Metrologia* 2019, vol.56,042001.
- Petit G, Arias E. F., Panfilò G. 2015 International atomic time: status and future challenges, *Comptes rendus Physique*, 2015, 16 (5), 480-488.
- Pombo, O. Bachelard et la cité savante, In : Bontems, V., (dir.), *Bachelard et l'avenir de la culture. Du surrationalisme à la raison créative*, Paris, Presses des Mines, 2018.
- Price, H. *Time's Arrow and Archimedes Point: New Directions for the Physics of Time*. Oxford University Press, 1996.
- Rheinberger, Hans Jörg, *Gaston Bachelard and the notion of « phénoménotechnique »*, Perspectives on science, 13/3, 2005, p. 313-328.
- Rheinberger, Hans-Jörg, *On Historicizing Epistemology*. Stanford: Stanford University Press, 2010.
- Rheinberger, Hans-Jörg. A Plea for a Historical Epistemology of Research, *Journal for General Philosophy of Science*, 43, 2012, p. 105-111.
- Rosa, H. *Accélération : une critique sociale du temps*. Paris, La Découverte, 2010.
- Rovelli, C. *Et si le temps n'existait pas ?* Paris, Dunod, 2012.
- Rovelli, C. Physics needs Philosophy. Philosophy needs Physics. *Foundations of Physics*, 2018, 48 (5), pp.481-491.

- Thorne, K. *Black Holes & Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. W. W. Norton & Company, 1994.
- van Rossum, G. D. *L'histoire de l'heure*. MSH Paris, 1997.
- Vigoureux, J.M. *L'univers en perspective*, Paris, Ellipses, 2006.
- Wolff, F. *Le temps du Monde*, Paris, Le Seuil, 2023.
- Wunenburger, J.-J., & Worms. *Bachelard et Bergson : Continuité et discontinuité. Une relation philosophique au cœur du XXe siècle en France. Actes du colloque international de Lyon, septembre 2006*. Paris, Presses Universitaires de France, 2008.
- Wunenburger J.-J. [dir.], *Bachelard et l'épistémologie française*, Paris, PUF, 2003

Bertrand Nicquevert

*Boson et vérité : donner du sens à la recherche,
À l'attention de l'Association internationale Gaston
Bachelard**

Dans un court roman de Véronique Bizot, *Mon couronnement*, le narrateur, un vieux monsieur de 87 ans, voit sa vie bouleversée par une invasion de visiteurs inattendus, venus le féliciter pour une découverte qu'il a effectuée bien des années auparavant, et qui « semble en passe d'ouvrir d'assez précieuses perspectives sur un problème [de santé] émergent ». Cette découverte avait été considérée à l'époque, écrit-il, comme « une fausse route scientifique, l'une de ces impasses scientifiques dans lesquelles nous autres chercheurs en recherche fondamentale nous fourvoyons constamment ». Elle avait été effectuée à une époque lointaine dont il a pratiquement tout oublié, « sinon le temps que nous consacrons à, jusqu'à preuve du contraire, tenir le probable pour faux ». Je vous révèle la chute de ce plaisant roman : le vieil homme est invité à son « couronnement » : « Quand j'eus gravi des marches à l'intérieur d'un édifice très éclairé, je vis, par la large embrasure d'une double porte, et sous les lustres et les brillances d'un vaste salon flanqué dans son fond d'une estrade et d'un micro, une foule de gens, [...] et je n'entrai pas ».

En peu de pages, ce sont ainsi les trois principales motivations possibles de la recherche scientifique qui sont évoquées : l'appétit de gloire, l'application sociétale, la quête de la vérité. En effet, qu'est-ce qui donne du sens à la recherche ? Qu'est-ce qui porte les chercheurs à s'adonner à cette pratique particulière ? Ce sera le thème des réflexions de ce jour, qui s'appuieront sur la découverte du désormais célèbre boson de Higgs.

Higgs, justement. Le professeur Peter Higgs était un vieux monsieur écossais de 84 ans lorsqu'il a vu sa vie bouleversée par une invasion de visiteurs, à vrai dire pas tout à fait inattendus quant à eux, et venus le féliciter en octobre 2013 pour une invention qu'il avait effectuée bien des années auparavant, en 1964 exactement, et qui « semble en passe d'ouvrir d'assez précieuses perspectives sur un problème » de physique assez fondamental : celui de l'origine de la masse.

Sans se plonger ici dans de longs développements, par ailleurs bien expliqués dans la littérature, que l'on retienne en peu de mots quelques considérations rapides et incomplètes sur les constituants ultimes de la matière et sur les forces fon-

* En guise de continuation à la visite du CERN, 1^{er} juin 2023.

damentales qui les relient. La matière stable qui nous entoure et dont nous sommes constitués est faite de quarks (qui par combinaison, composent les neutrons et les protons, constituants des noyaux des atomes), d'électrons (dont la probabilité de présence autour du noyau est régie par les lois de la mécanique quantique) et de neutrinos, particules élusives s'il en est. Par ailleurs, Modèle Standard de la physique retient quatre interactions fondamentales : la gravitation, surtout sensible aux échelles de l'infiniment grand ; la force électromagnétique, expliquant les relations entre particules chargées ; la force nucléaire dite « forte », permettant aux protons de demeurer au sein du noyau en dépit des forces de répulsion électromagnétique ; et enfin la force nucléaire dite « faible », à l'origine des désintégrations et de la radio-activité. Chacune de ces forces est portée par un boson : le graviton (pas encore découvert, mais on a déjà observé des ondes gravitationnelles en 2016, donc il n'est pas loin...) ; le photon pour la force électromagnétique, et dont la masse est nulle ; les gluons pour la force forte, de huit types différents, et tous de masse nulle ; et enfin, pour la force faible, les bosons poétiquement nommés W^+ , W^- et Z^0 . Et ces zozos-là ont une masse pas nulle du tout. Qu'a fait Higgs, ainsi que quelques autres physiciens, dans les années 1960 ? Inventer un mécanisme dit de « brisure spontanée de la symétrie électrofaible », à l'origine précisément de la masse de ces zozos, et de toutes les autres particules qui sont dotées de masse, par interaction plus ou moins intense avec un « champ de Higgs ». C'est précisément cette découverte théorique du professeur Higgs qui a été couronnée en octobre 2013 du prix Nobel de physique. Une récompense prestigieuse entre toutes, attribuée conjointement au professeur belge François Englert, les deux récipiendaires s'étant spontanément accordés pour y associer le nom du collègue du second d'entre eux, hélas décédé juste deux ans trop tôt : le professeur Robert Brout.

Le jour où le comité Nobel devait annoncer le nom des lauréats, Peter Higgs s'est éclipsé, volontairement – victime d'une affection bien particulière, la « nobélite ». Après l'annonce de la découverte du boson « qui porte mon nom », comme il aimait joliment à le dire, il se doutait bien que pareil destin le guettait. Il avait été si heureux que la découverte soit survenue « de [s]on vivant » ! C'est donc avec un mélange de fausse modestie et de réelle humilité que Peter Higgs avait fui ce jour-là la horde de journalistes qui a envahi sa vie, à l'image du héros de notre roman. Pas pour longtemps : Higgs est, quant à lui, bien entré « dans l'édifice très éclairé », et sur l'estrade, il a bien prononcé son « discours Nobel »¹. Higgs, comme Englert, ont en effet été couronnés le 10 décembre 2013 à Stockholm.

Est-ce pour autant ce couronnement, si prestigieux soit-il, qui donne sens à ses travaux ? Ou bien sont-ce les applications potentielles de cette découverte qui motivent l'intérêt qu'on porte aujourd'hui à leur invention ? Ou plutôt le simple désir de comprendre, de distinguer le vrai du faux, bref, de « trouver la vérité » ? C'est ce à quoi je m'attacherai dans le présent article.

Le rôle du boson de Higgs est multiple : vers l'infiniment grand de la cosmologie, vers l'infiniment petit des constituants ultimes de la matière, et vers l'infini-

¹ The Nobel Banquet 2013, <http://www.nobelprize.org/ceremonies/archive/video/banquet/2013/index.html>.

niment complexe de l'ingénierie de la physique des particules d'une part, et de l'émergence de la vie d'autre part. C'est une histoire en soi. En très bref, ce boson responsable de la célèbre brisure spontanée de la symétrie électrofaible, brisure qui engendre des particules massives, c'est lui qui permet au soleil de fonctionner et à la vie d'apparaître. En d'autres termes, quoique le raccourci soit saisissant : sans lui, nous n'existerions pas.

Je voudrais ici nous faire avancer sur les sentiers plus ou moins obscurs de la science contemporaine, en détaillant par quelle méthode le boson a été découvert, et par là, illustrer les motivations des chercheurs et chercheuses, et voir quel sens donner à la recherche scientifique. Le petit roman évoqué en introduction indiquait trois pistes (parmi d'autres, sans doute) qui motivent la recherche scientifique : les applications, la reconnaissance, et la quête de vérité. Empruntons-les une à une.

Les applications de la science sont essentielles, assurément ; elles nourrissent la technique et irriguent la société, elles résolvent bien des problèmes, et à l'inverse elles en posent bien d'autres ; mais les applications ne sont pas la motivation première des chercheurs des disciplines fondamentales. Henri Poincaré l'a affirmé clairement : « Il suffit d'ouvrir les yeux pour voir que les conquêtes de l'industrie qui ont enrichi tant d'hommes pratiques n'auraient jamais vu le jour si ces hommes pratiques avaient seuls existé, et s'ils n'avaient été devancés par des fous désintéressés qui sont morts pauvres, qui ne pensaient jamais à l'utile, et qui pourtant avaient un autre guide que leur caprice »².

Au reste, nous sommes bien incapables à ce jour d'imaginer la moindre application au concept de boson de Higgs ! Mais qu'importe : une chose est sûre, s'il n'avait pas été découvert en 2012, on n'aurait aucune chance d'en élaborer une application, disons, en 2062, cinquante ans plus tard.

Prenez en effet l'exemple de l'électron : découvert en 1897, il a fallu attendre cinquante ans, 1947, pour que soit inventé le transistor, sa première application pratique. Et les exemples de ce genre abondent ! La recherche d'applications ne constitue donc pas la motivation profonde de la science fondamentale – même si elle est parfois utilisée comme argument pour convaincre les politiciens. (Une anecdote pour conclure sur ce point : un ministre britannique du XVIII^e siècle interroge Faraday sur les applications possibles de cette toute nouvelle découverte étrange, dénommée « électricité ». Celui-ci réplique : « Je n'en sais rien, mais je parie qu'un jour votre gouvernement la taxera »³).

Quant à la poursuite plus ou moins avide de reconnaissance institutionnelle, sous forme de prix, de primes ou de promotions, de gloire et de célébrité, elle ne saurait être retenue qu'en tant qu'adjuvant, certes parfois stimulant puissant, mais souvent parfaitement secondaire et collatéral. Représentons-nous ainsi le jeune Peter Higgs, à même pas 35 ans : il sue à grosses gouttes sur un article reprenant un

² Poincaré, H., *Science et méthode*, Paris, Flammarion, 2011.

³ Cette anecdote sans doute apocryphe est évoquée à propos de Sir Robert Peel, Premier ministre britannique, lors d'une visite des laboratoires de la Royal Society (dans les années 1820 vraisemblablement) sur l'utilité de la dynamo.

projet antérieur de publication, et qui vient d'être refusé. Il développe, complète, précise, et au détour du post-scriptum, il imagine, si j'ose dire presque « en passant », l'existence hypothétique d'un boson. Est-il raisonnable de penser qu'il se prête à tel labeur dans l'espoir d'obtenir le prix Nobel cinquante ans plus tard ? Assurément non : c'était la démarche intellectuelle qui le motivait, et le simple désir que ses idées soient diffusées et discutées, afin de faire progresser la manifestation de la vérité.

C'est donc cette quête de vérité qui, à elle seule, motive la recherche fondamentale et lui donne son sens. Non pas tant « l'art pour l'art », mais « la science pour la science », si l'on veut. La raison d'être des chercheurs est ailleurs que dans la quête de gloire ou de richesse : la curiosité, l'envie comprendre le monde qui nous entoure, le désir d'élaborer une explication rationnelle des phénomènes observés, voilà différentes façons de l'exprimer. La clé réside donc dans cette méthode scientifique, considérée par les savant·e·s comme le chemin menant à cette vérité. C'est pourquoi, afin de comprendre comment elle fonctionne, nous allons maintenant observer par quel processus l'invention théorique de 1964 est devenue une découverte expérimentale établie, et ce que cela signifie d'affirmer que l'existence du boson de Higgs est « scientifiquement prouvée ».

Selon les critères actuels, Higgs n'aurait sans doute aucune chance d'être publié... C'est dire à quoi cela tient : victime de l'adage de la pression sur le chercheur, *publish or perish*, le boson aurait alors sombré avec son créateur éponyme, et la face de la physique en eût été bien changée. Mais son article a été publié – et le boson découvert. Retraçant son histoire, nous y verrons à l'œuvre trois figures archétypiques de scientifiques : le théoricien, l'expérimentateur, l'instrumentateur.

Première étape, donc : un individu, Peter Higgs, « invente » (c'est le terme consacré) une nouvelle particule. Cette particule est la conséquence logique du mécanisme imaginé pour expliquer la brisure spontanée de la symétrie électrofaible, un mécanisme (mathématique) inventé de manière indépendante et simultanée (quoique sous une forme différente) par Robert Brout et François Englert, et qui porte leur nom à tous les trois, le mécanisme dit BEH : Brout – Englert – Higgs. Mais seul Higgs a évoqué dans son article l'existence concomitante de ce que l'on appelle dans le jargon de la physique contemporaine un « boson scalaire associé » ; et c'est pourquoi ledit boson se voit baptisé de son seul nom. Toutes ces réflexions s'inscrivent en 1964 dans une dynamique qui a impliqué de nombreux autres physiciens⁴. Retenons que, pour expliquer un phénomène physique, la brisure spontanée de la symétrie électrofaible, voici notre boson inventé par quelques cerveaux en ébullition.

Les expérimentateurs s'emparent alors progressivement de l'idée et imaginent des expériences plus ou moins cruciales pour déceler la bête. Et j'utilise à dessein

⁴ Voir Carroll, S., *Higgs, le boson manquant*, Paris, Belin, 2013, et Cohen-Tannoudji, G. ; Spiro, M., *Le boson et le chapeau mexicain*, Paris, Gallimard, 2013.

cette expression, “la bête”, puisque la bible du domaine, parue dès 1989, s’intitule *The Higgs Hunter’s Guide*, le Manuel du chasseur de Higgs⁵.

(De là à parler de chasse au bison de Higgs, il n’y a d’ailleurs qu’un pas, allègrement franchi par l’illustratrice Lison Bernet⁶).

Que trouve-t-on dans ce manuel, fort peu recommandable au néophyte ? Entre autres, la description de tous les modes possibles de désintégration du boson de Higgs en d’autres particules déjà connues, avec leur probabilité respective d’occurrence. Et tout cela aide le physicien expérimentateur à concevoir ses expériences : si le Higgs se désintègre en telle ou telle particule selon tel ou tel mode, alors il faut pouvoir les détecter de telle ou telle manière. Je n’en évoquerai qu’un seul : la désintégration du Higgs en quatre muons. Un très bon canal (c’est le terme usité), car une telle signature est facile à repérer, son rapport signal / bruit étant très bon – en d’autres termes, les processus autres que la désintégration du Higgs et qui possèdent la même signature sont relativement rares. On va donc pouvoir compter parmi les résultats expérimentaux, et comparer avec la prévision de la théorie : combien de fois prévoit-on la survenue de cette signature si le Higgs n’existe pas, et combien de fois s’il existe ? Ensuite, il suffit de faire la somme. Si c’est le second chiffre qui l’emporte, c’est que le Higgs existe. Sinon c’est qu’il n’existe pas. Facile !

La stratégie expérimentale semble donc facile, mais pour chasser le Higgs potentiellement créé par le LHC, il faut être dûment équipé. D’où les deux énormes détecteurs polyvalents construits et installés au CERN, ATLAS et CMS. Car chasser le Higgs sans eux, c’est comme traquer un colibri de nuit avec une sarbacane : bonne chance. C’est là qu’intervient la troisième figure, celle de l’instrumentateur, concepteur et réalisateur de tels instruments. Lesquels instruments seront exploités par les groupes d’expérimentateurs pour valider ou réfuter les modèles des théoriciens, pour peu qu’ils aient été proprement adaptés à l’observation.

(À vrai dire, la réalité de terrain est un peu plus complexe que ce “pas de deux” entre le théoricien et l’expérimentateur : il existe toute une gradation de nuances, depuis le théoricien le plus éthéré jusqu’à l’expérimentateur le plus bricoleur. Peter Galison⁷ souligne que les groupes expérimentaux possèdent leurs “propres” théoriciens, des théoriciens qui travaillent sur le concret, et non pas sur des considérations spéculatives extérieures, mais suffisamment proches de la spécificité d’une machine pour qu’ils puissent commencer à mettre les données dans une forme comparable aux résultats des modèles issus de la théorie. Du côté de la théorie aussi, on commence à considérer les “phénoménologistes”, dont le travail consiste à imaginer des conséquences expérimentalement vérifiables des théories, leurs variantes et leurs concurrentes. Schématiquement, plutôt que de la simple comparaison théorie ↔ expérience, on a plutôt affaire à une

⁵ Cité moins de 5 fois par an en moyenne jusqu’en 2012, il l’a été plus de 50 en 2013, environ 80 fois durant les trois premiers mois de l’année 2014, et des milliers de fois depuis. Le boson est tué, et c’est maintenant que semblent s’éveiller les chasseurs...

⁶ Site <http://www.lhc-france.fr/l-aventure-humaine/la-bd-du-lhc/>.

⁷ Galison, P., *Image & Logic*, Chicago, Chicago Univ. Press, 1997.

chaîne de comparaisons : théorie \leftrightarrow phénoménologie des théoriciens \leftrightarrow théorie des expérimentateurs \leftrightarrow expérience.)

C'est précisément ce que Bachelard appelait la « phénoménotechnique » : les instruments scientifiques sont pour lui des « théories matérialisées ».

À ce stade, revenons au comité Nobel et à son communiqué, que je vous redonne in extenso en français : le prix Nobel de physique 2013 est décerné conjointement à François Englert et à Peter W. Higgs pour « la découverte théorique d'un mécanisme contribuant à notre compréhension de l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmée, grâce à la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS sur le grand collisionneur de hadrons du CERN »⁸. Les deux lauréats n'ont pas manqué de rendre un hommage appuyé aux travaux du CERN et des deux expériences, et c'est donc un long travail collectif qui est ainsi indirectement récompensé. Le travail de ceux que Bachelard désigne sous le magnifique terme de « travailleurs de la preuve »⁹.

Résumons : en 1964, quelques théoriciens inventent un mécanisme théorique supposant l'existence d'une nouvelle particule, le boson dit de Higgs. Le dit boson est intégré dans Modèle Standard de la physique des particules. Des expérimentateurs élaborent des expériences susceptibles d'en prouver l'existence, en calculant les probabilités relatives de ses modes de désintégration. Puis des instrumentateurs imaginent d'une part une machine suffisamment puissante pour créer l'animal – c'est le collisionneur LHC ; et d'autre part deux détecteurs particulièrement réactifs et d'une acuité hors du commun, ATLAS et CMS, afin d'observer les traces de la désintégration spontanée du boson, les empreintes de la bête.

(Pourquoi tant de temps entre l'invention et la découverte, pourra-t-on légitimement s'interroger. Un demi-siècle, une paille ! C'est le temps de concevoir techniquement et d'organiser un tel effort financièrement, politiquement et en termes de conduite de projet. Je prends juste un exemple, qui sera parlant pour souligner la complexité récursive de la méthode scientifique : pour atteindre les champs magnétiques nécessaires, il fallait recourir à la technologie des aimants supraconducteurs. Laquelle n'a été développée que dans les années 1970, et réellement comprise qu'à partir de 1986. La supraconductivité est par ailleurs basée sur un effet quantique particulier, une brisure spontanée de symétrie découverte à la fin des années 1950. Laquelle avait inspiré par analogie, cela ne s'invente pas, l'un des théoriciens étudié par... Peter Higgs soi-même¹⁰ ! La supraconductivité, issue de la théorie des quanta, est à l'origine non seulement de la découverte expérimentale du boson, grâce aux aimants supraconducteurs, mais aussi de son invention théorique !)

⁸ Voir le développement proposé dans Klein, E. ; Depambour, G., *Idées de génies, 33 textes qui ont bousculé la physique*, Paris, Champs-Flammarion, 2021.

⁹ Bachelard, G., *Le rationalisme appliqué*, Paris, Les Presses universitaires de France, 1949.

¹⁰ Blundell, S., *La supraconductivité, 100 ans après*, Paris, Belin, 2011, p. 92.

La bête est donc enfin saisie, et le trophée arboré au fronton de la science en gloire le 4 juillet 2012. Comment fut-elle attrapée ? Quelle preuve de son existence a-t-on rapporté ? A-t-on pu flasher son visage ? Quel critère d'existence de cette évasive particule ?

La formulation de la découverte est ainsi formulée, à l'issue de deux publications de 30 pages de calculs et figures (et autant de pages consacrées à lister les près de 3000 auteurs pour chaque expérience, parmi lesquels votre humble serviteur au sein de la collaboration ATLAS) : « L'observation atteint une signification de 5,9 sigma, correspondant à une probabilité de fluctuation du bruit de fond de $1,7 \times 10^{-9}$, elle est donc compatible avec la production et la désintégration du boson de Higgs du Modèle Standard »¹¹.

Est-ce là une preuve bien convaincante ? Pourquoi ces presque six sigma et cette « signification », et en quoi sont-ils une preuve d'existence ? Et d'ailleurs, c'est quoi un « sigma » ? Et surtout, en quoi constituerait-il un critère universel ? (Et au reste, la science est-elle universelle... Vaste sujet s'il en est.)

Notre vieil homme du roman l'avait relevé fort subtilement : il s'agit de « tenir le probable pour faux, jusqu'à preuve du contraire ». Or, sigma, l'écart-type, est en statistique la « moyenne des écarts à la moyenne » ; c'est donc en fait une sorte de probabilité.

Tentons une explication simple et assez éclairante de ce que représente un sigma, inspirée des éclaircissements proposés par un physicien, ancien directeur général du CERN. « En physique des particules, le caractère significatif d'une observation est mesuré en termes d'écarts-types, en abrégé, sigma. L'écart-type mesure la probabilité qu'une observation soit due au hasard au lieu de signaler une découverte. Des effets de deux sigma sont susceptibles de se produire avec une régularité comparable à celle de deux jets de dé produisant deux six consécutifs. L'effet de trois sigma correspond à une probabilité de quelques millièmes qu'une observation soit due au hasard : il s'agit du point auquel il est généralement admis qu'une observation devient intéressante. Pour qu'il y ait découverte, il faut cependant cinq sigma ; à ce point, on considère qu'il y a moins d'une chance sur un million que l'observation soit l'effet du hasard »¹².

Retenons de ces explications « officielles » deux éléments fondamentaux.

Le premier élément, c'est qu'une telle découverte, dans le monde de la physique des particules contemporaine, ne s'obtient plus par une belle photographie d'un golden event, un « événement en or » qui montrerait l'animal en pleine course sur fond de chambre à bulles (c'était encore le cas dans les années 1960). Au XXI^e siècle, une découverte en physique des particules est fondée sur une accumulation statistique de données numériques : l'on récolte beaucoup, mais alors vraiment beaucoup de données, l'on reconstitue les événements dont elles sont la trace, l'on effectue un nombre considérable de calculs statistiques, et enfin, l'on regarde si une certaine somme de

¹¹ ATLAS Collaboration. Aad, G., et al., Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson with the ATLAS Detector at the LHC. Physics Letters B, Vol. 716, No 1, pp. 1-29, 2012. doi:10.1016/j.physletb.2012.08.020.

¹² Heuer, D., « Une fin d'année pleine de suspens », <http://cds.cern.ch/record/1416005?ln=fr>.

certaines événements est suffisante pour distinguer l'hypothèse « le boson de Higgs existe » de l'hypothèse « le boson de Higgs n'existe pas » (Pour paraphraser audacieusement Camus, c'est un peu « je récolte, donc nous sommons »...).

Au fil du temps, l'on a commencé par le stade de l'indice, ou du soupçon, à 3 sigma, dont l'intérêt peut retomber (ce fut le cas lors de la fin du LEP, en novembre 2000, où l'on avait atteint 2,8 sigma, lesquels se sont estompés ensuite, et à vrai dire, le signal n'était pas au bon endroit, ce que l'on ne sait que maintenant) ; puis l'on a atteint le stade de l'annonce de la découverte d'un boson « Higgs-like » (semblable au Higgs) lors de l'annonce du 4 juillet 2012) à environ 4,9 sigma : quasi cinq ! Puis l'on est parvenu à la preuve définitive de son existence (dès la mi-septembre et les articles cités plus haut) ; et enfin il fut démontré (à Moriond, en mars 2013) que les caractéristiques de ce « Higgs-like » étaient bien celles du boson de Higgs théorique du Modèle Standard, ce qui ouvrit définitivement la voie à l'attribution du Nobel.

C'est là que réside le deuxième élément fondamental, qui ne manquera sans doute pas d'étonner : le critère de vérité serait-il arbitraire ? Plus exactement, il est construit et négocié : c'est par convention qu'est fixé le seuil de découverte à 5 sigma. Pas 4, ni 6 ; 5. Alors, quelle sorte de preuve scientifique est-ce donc là ?

Tâchons de prendre un peu de recul sur cette méthode scientifique, en s'adonnant à un peu de philosophie des sciences, ce qui est sans doute une autre bonne façon de donner du sens à la recherche. Ce caractère conventionnel de l'établissement de la preuve n'est pas propre à la physique des particules, même s'il y est peut-être un peu mieux formalisé et plus visible. Le processus de validation des connaissances scientifiques, via les publications qui en sont la pierre de touche, est un processus de validation par les pairs, c'est-à-dire par les homologues.

Le savoir scientifique serait-il donc pour autant une construction purement conventionnelle, soumise au relativisme le plus appuyé, et sans réelle confrontation avec le réel ?

Je m'en tiendrai ici à quelques premiers éléments, sans doute pas aussi subtils et complexes qu'il serait nécessaire, mais qui nous seront suffisants à ce stade pour analyser la découverte du boson de Higgs. Il n'est pas encore temps de tirer les conclusions d'un travail en cours : comme le souligne Bachelard, « on ne pourra dessiner le simple qu'après une étude approfondie du complexe »¹³, et le complexe, c'est un peu long à étudier en profondeur.

La plupart des scientifiques estiment que « les connaissances scientifiques sont l'aboutissement d'une réflexion et d'une pratique rationnelles », et qu'en science « on ne croit à rien, on ne compare pas des opinions, on ne soumet pas un résultat au vote populaire »¹⁴ ; ce que l'on fait, c'est que l'on démontre, que l'on doute et réfute, que l'on vérifie et réplique, et que l'on corrige si nécessaire. La dimension rationnelle du travail est indéniable, et sans doute

¹³ Bachelard, G., *La philosophie du non*, Paris, PUF, 1940.

¹⁴ Balibar, S., *Chercheur au quotidien*, Paris, Seuil, 2014, p. 69.

indispensable pour la distinguer d'autres modes de production de connaissance du monde.

Mais est-il suffisant d'être rationnel pour être scientifique ? Considérons davantage la démarche scientifique comme une démarche collective, au cours de laquelle les scientifiques traquent systématiquement l'erreur possible, et progressent pas à pas dans l'établissement d'une représentation du monde commune, d'une *Weltanschauung* qui soit aussi conforme que possible, à un moment donné, aux phénomènes tels qu'observés à ce moment donné. Car les phénomènes aussi sont observés et obtenus à un moment donné, et leur qualité et leur précision évoluent au gré des progrès de l'instrumentation scientifique.

La science établit une description et une explication des phénomènes qui soit la plus plausible possible à un moment donné, et qui fasse consensus au sein de la communauté scientifique. Hubert Reeves aime à dire que « la science n'est pas le terrain de la vérité, mais le champ du plausible »¹⁵.

De fait, les vérités d'aujourd'hui sont les controverses d'hier, et les erreurs de demain. Victor Hugo l'a admirablement formulé : « La science est l'asymptote de la vérité. Elle approche sans cesse, et ne touche jamais »¹⁶.

Je propose en guise de synthèse un chemin vers la sagesse qui serait inspiré par la démarche de la recherche scientifique, au travers de trois étapes progressives : récolter des données, en tirer des informations, et les transformer en connaissance. Partir des données issues de l'observation des signaux émis par des phénomènes physiques, puis les transformer en informations élaborées à partir de l'interprétation de ces données, et enfin utiliser ces informations pour forger de la connaissance scientifique (théories, hypothèses, lois). Cette connaissance est validée à un moment donné, après confrontation avec les données et informations, par sa capacité à expliquer de manière plausible lesdites données et informations, et elle offre en retour un modèle pour filtrer les observations et interpréter les données.

Appliqué à notre cher boson, voir le tableau ci-dessous, au niveau instrumental, cette démarche se traduit schématiquement ainsi : les détecteurs récoltent des données, sous forme d'une position spatiale et d'une datation d'un signal électrique ou optique généré par le passage d'une particule : quelque chose est passé à tel endroit à tel instant. Puis les données sont traitées, soit par de l'électronique embarquée, soit par des puissants algorithmes tournant dans des fermes de milliers d'ordinateurs, pour produire une information : celle de l'existence et de la forme de la trajectoire d'une particule, présentant des caractéristiques géométriques particulières. Confrontées au contexte dans lequel cette particule évolue (à savoir la présence et la valeur vectorielle d'un champ magnétique, ainsi que la nature du matériau traversé), l'information sur la trajectoire devient, par reconnaissance de

¹⁵ Émission de France-Culture « La méthode scientifique », 25 février 2017.

<https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/la-methode-scientifique/lecon-de-cloture-par-hubert-reeves-2221540>.

Voir aussi <http://lecheneparlant.blogspot.com/2017/03/hubert-reeves-lultime-guerrier-de-la.html>.

¹⁶ Hugo, V., *William Shakespeare*, Première partie, Livre III "L'Art et la science", IV.

sa charge, de sa quantité de mouvement, de son énergie, une connaissance de la nature même de la particule ainsi détectée.

À un stade expérimental, les données sont constituées des connaissances du stade instrumental précédent : la nature des particules détectées. À partir de ces données, d'autres puissants algorithmes établissent une nouvelle information, celle de la fréquence respective de survenue de telle ou telle particule. Ces résultats sont ensuite comparées avec les probabilités d'occurrence qui sont issues de simulations (qui sont des modèles interprétatifs issus de la théorie du Modèle Standard de la physique des particules), et aboutissent à une connaissance : le boson de Higgs existe.

Cette connaissance sur l'existence du boson devient à son tour une donnée pour le théoricien, qui élimine ainsi toutes les élaborations théoriques fondées sur l'hypothèse de la non-existence dudit boson, ou celles qui supposaient que sa masse était par exemple supérieure à celle du quark top. L'existence du Higgs et ses caractéristiques quantiques mesurées, masse, spin, sont ensuite interprétées pour produire une information sur les nouvelles particules théoriquement prédites, par exemple sur les particules supersymétriques. Une nouvelle théorie, connaissance scientifique (encore hypothétique à ce stade), est alors élaborée ou affinée, et appliquée aux données initiales : ces nouvelles particules interagissent-elles avec le boson ? En entrevoit-on des indices expérimentaux ?

Et ainsi de suite, de manière récursive et complexe.

Théorie, expérience, instrument

	Instrument (Détecteur ATLAS)	Expérience (Analyse ATLAS et CMS)	Théorie (Physique)
Wisdom Savoir	Solutions optimales pour une sensibilité et une performance élevées	Stratégies et algorithmes améliorés	Progrès de la science, et de la technique
Knowledge Connaissance	Nature de la particule (charge, masse, spin)	Existence et masse du boson BEH	Prédictions théoriques des propriétés de nouvelles particules
Information	Reconstruction de la forme de la trajectoire d'une particule	Probabilité de son implication dans la désintégration du boson BEH	Contraintes sur les théories au-delà du Modèle Standard
Data Donnée(s)	Position spatiale et temporelle d'un signal électrique	Nature de la particule (charge, mass, spin)	Existence et masse du boson BEH

Couronnement d'un siècle de physique inauguré par l'année miraculeuse d'Einstein en 1905, le boson de Higgs pourrait ainsi, de manière symétrique, constituer le

socle sur lequel se construit le siècle suivant. Le boson tant recherché, conceptualisé voici 50 ans, a été découvert hier ; il devient objet d'étude dès aujourd'hui ; et le même boson sera demain instrument de mesure lui-même, étant potentiellement sensible aux particules élusives qui constituent l'énigmatique matière sombre.

Le travail est au reste déjà engagé, et les premiers articles qui fixent les premières limites aux propriétés de ces particules ont été publiés dès 2014¹⁷. Et jusque-là il est resté sans résultat : aucun indice expérimental d'une nouvelle physique au-delà du Modèle Standard n'a été décelé, on n'a pour l'instant rien trouvé, ou pour le dire plus exactement, on a trouvé qu'il n'y avait rien à trouver, ce qui n'est pas tout à fait la même chose d'ailleurs. Mais ce n'est pas fini ! On continue à puiser dans les données, à augmenter les énergies, les intensités et les luminosités, à accumuler les calculs et les simulations. Cycle sans fin, mouvement perpétuel, l'aventure scientifique et humaine continue. La fièvre des particules n'est pas près de tomber.

Et la sagesse dans tout cela ? On peut la voir comme une synthèse des connaissances, qui aboutit à cette représentation du monde, à cette cosmogonie cosmologique qui permet de comprendre le lien intime entre physique des particules et astrophysique, entre infiniment grand et infiniment petit, lien tissé par l'infiniment complexe.

Peut-être la sagesse consiste-t-elle surtout à saisir que la vérité n'est jamais acquise, et que le seul élément de certitude scientifique tient dans la démarche elle-même. Hugo, encore lui, l'a saisi d'une formule extraordinaire : « La science cherche le mouvement perpétuel. Elle l'a trouvé ; c'est elle-même. » Après tout, n'est-ce pas la science elle-même qui a établi que toute connaissance est à jamais indéterminée (Heisenberg et son principe), incomplète (Gödel et son théorème) et autoréférente¹⁸ (Kant et sa Critique de la raison pure : « C'est notre faculté de connaître qui organise la connaissance, et non pas les objets qui la déterminent ») ?

Arrivé à ce point, notre réflexion pourrait s'enfoncer profondément dans les sous-bois sur ces Holzwege, ces chemins qui semblent ne mener nulle part¹⁹. Le voyage que nous avons entrepris nous fait longer des abysses conceptuellement aussi vertigineux que ceux de l'infiniment petit, de l'infiniment grand et de l'infiniment complexe réunis... Avancer davantage requiert des approfondissements qui seront l'objet de travaux ultérieurs. J'escompte y faire partager mon affection pour Bachelard, et sur la manière dont il dépasse de manière admirable la tension dialectique entre réalisme et rationalisme. Il faudra aussi présenter les épistémologies constructivistes, qui revisitent de manière radicale les perspectives traditionnelles des modes d'acquisition de la connaissance. La matière à réflexion ne manque point.

L'on dit communément que "c'est vrai, puisque c'est scientifiquement prouvé". J'espère vous avoir quelque peu sensibilisé au fait que la preuve scientifique tient davantage de la marche en avant pétée de doute que de la vérité intangible et

¹⁷ ATLAS collaboration, Aad et al., Search for Dark matter in Events with a Hadronically Decaying W or Z Boson and Missing Transverse Momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector, Phys. Rev. Letters, 112, 041802, 2014.

¹⁸ Voir par exemple Gigand, G., *La trialectique, un outil transdisciplinaire*, Paris, Ed. Sociales, 2010.

¹⁹ Allusion à Heidegger, M., *Holzwege : chemins qui ne mènent nulle part* [1950], Paris, Galimard, 1986.

éternelle : ce qui est scientifiquement prouvé ne l'est en fait qu'ici et maintenant et, n'est scientifique que ce qui est réfutable. Impermanence de la connaissance, fragilité de la vérité, dynamique de la pensée. Citons Gonseth, ce mathématicien et philosophe suisse contemporain de Bachelard : « La recherche ne serait pas ce qu'elle est si elle ne pouvait pas être appelée à témoigner contre elle-même. [...] Cette mise en accusation continue de l'ancien par le nouveau n'a rien d'arbitraire, elle est comme la respiration même de la recherche »²⁰. Cette respiration-là gagnerait assurément à ne pas être réservée à la recherche scientifique...

Comme l'a écrit Saint-Bernard, « que ceci soit la fin du livre – mais non la fin de la recherche »²¹.

Bertrand Nicquevert

en congé spécial du CERN, Genève, Suisse,
détaché au Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley USA
chercheur associé à l'ENS Paris-Saclay
Bertrand.Nicquevert@cern.ch

Références

- ATLAS collaboration, Aad et al., Search for Dark matter in Events with a Hadronically Decaying W or Z Boson and Missing Transverse Momentum in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector, Phys. Rev. Letters, 112, 041802, 2014 ;
- ATLAS Collaboration. Aad, G., et al., Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson with the ATLAS Detector at the LHC. Physics Letters B, Vol. 716, No 1, pp. 1-29, 2012 doi:10.1016/j.physletb.2012.08.020 ;
- Bachelard, G., *La philosophie du non*, Paris, PUF, 1940 ;
- Bachelard, G., *Le rationalisme appliqué*, Paris, Les Presses universitaires de France, 1949 ;
- Badaut, F., Busato, E., Madar, R., Orloff, J., *Sur La route du Boson*, Paris, Ed. Reflets d'ailleurs, 2015.
- Balibar, S., *Chercheur au quotidien*, Paris, Seuil, 2014 ;
- Bizot, V., *Mon couronnement*, Arles, Actes Sud, 2011 ;
- Blundell, S., *La supraconductivité, 100 ans après*, Paris, Belin, 2011 ;
- Carroll, S., *Higgs, le boson manquant*, Paris, Belin, 2013 ;
- Cohen-Tannoudji, G. ; Spiro, M., *Le boson et le chapeau mexicain*, Paris, Gallimard, 2013 ;
- Duby, G., *L'art cistercien*, Paris, Flammarion, 1998 ;
- Émission de France-Culture « La méthode scientifique », 25 février 2017 ;
- Gagnon, P., *Qu'est-ce que le boson de Higgs mange en hiver*, Éd. Multimondes, 2015.
- Galison, P., *Image & Logic*, Chicago, Chicago Univ. Press, 1997 ;
- Gigand, G., *La trialectique, un outil transdisciplinaire*, Paris, Ed. Sociales, 2010 ;
- Gonseth, F., *Mon itinéraire philosophique*, Paris, Ed. de l'aire, 1994 ;
- Heidegger, M., *Holzwege : chemins qui ne mènent nulle part* [1950], Paris, Gallimard, 1986 ;
- Heuer, D., « Une fin d'année pleine de suspens », <http://cds.cern.ch/record/1416005?ln=fr;https://www.radiofrance.fr/franceculture/podcasts/la-methode-scientifique/lecon-de-cloture-par-hubert-reeves-2221540>;
- Hugo, V., *William Shakespeare*, Première partie, Livre III « L'Art et la science », IV ;

²⁰ Gonseth, F., *Mon itinéraire philosophique*, Paris, Ed. de l'aire, 1994, pp. 19-20.

²¹ Duby, G., *L'art cistercien*, Paris, Flammarion, 1998 [Arts et Métiers Graphiques, 1976], p. 197.

- Klein, E. ; Depambour, G., *Idées de génies, 33 textes qui ont bousculé la physique*, Paris, Champs-Flammarion, 2021 ;
- Levinson, M., Kaplan, D., Le film *Particle Fever*, 2014, <http://particlefever.com>
- Poincaré, H., *Science et méthode*, Paris, Flammarion, 2011.

Ferdinand Gonseth

Le problème du temps. Essai sur la méthodologie de la recherche. Neuchâtel, Editions du Griffon, 1964

Extraits choisis en vue de présenter la théorie de Gonseth sur le problème du temps comme constitution d'un temps synthétique à partir de plusieurs mesures (dans l'ordre ordinaire du langage, dans l'ordre vital de la physiologie, dans l'ordre scientifique (mathématique, astronomique et physique), dans l'ordre intuitif). A chacun de ces niveaux, la connaissance est un engagement dans le réel qui parcourt un va et vient entre une hypothèse émise par le sujet et une confrontation au réel, puis la correction. La multiplication des méthodes de mesure permet de constituer un temps synthétique plus stable et plus précis.

Livre I. Le temps et le langage

(...) Il est clair que le temps des horloges, aussi bien que le temps des calendriers, comportent une certaine part de conventionnel. L'histoire même du calendrier, de son institution et de ses réformes, en fait directement la preuve. Et quant au temps des horloges, le fait qu'il suffit d'une décision légalement fondée pour passer par exemple de l'*heure d'hiver* à l'*heure d'été*, rend la part laissée au conventionnel tout à fait manifeste. Le caractère objectif du temps ainsi « défini » en est-il affaibli ? On ferait une erreur d'interprétation en l'admettant. Ce qui fait l'objectivité des indications temporelles exprimées par la langue, c'est qu'elles s'interprètent par des faits que les fluctuations de la subjectivité n'atteignent pas. Que ces faits soient d'ordre naturel, comme la succession des jours et des nuits, ou d'ordre institué comme la succession des mois, peu importe. L'objectif n'est pas seulement dans ce que nous subissons, mais aussi dans ce que nous édifions.

L'objectivité des variantes dont il vient d'être question est-elle un caractère bien spécifiable, un caractère pur ? c'est là une question mal posée, puisque l'idée d'objectivité est elle-même une idée ouverte¹. L'objectivité, qui viendra s'investir dans les mots, en tant que signification, ne pourra jamais être mieux définie que celle qui s'éprouve dans notre faire.

¹ Gonseth prône une méthodologie ouverte, au sens où une doctrine, un terme ou un concept sont toujours appelés à évoluer et ne peuvent jamais rester identiques. Un des facteurs de cette évolution est l'expérience : « opter pour l'expérience, c'est opter pour l'ouverture. » (Le problème du temps, p. 356) Cette ouverture constitue la dynamique même de la recherche : « une recherche vise autre chose qu'elle-même. Elle ne forme pas un tout qui se referme sur soi » (p. 348). NdE, SC.

Il est plus important de remarquer que, à mesure que le sujet s'efface, que le discours devient indirect et que disparaît toute allusion à celui qui parle ou qui écrit, la part que prend une certaine imagination créatrice et théorisante à l'énonciation discursive devient de plus en plus déterminante. Les exemples suivants en témoignent :

Les premiers vestiges des hommes datent de plus de cinq cent mille ans.

[78] *On peut maintenant parler avec objectivité d'une durée de l'ordre du millionième de seconde.*

Le concours de cette imagination n'est pas toujours aussi frappant ; il doit être, cependant, relevé dans tous les domaines de l'histoire, et même toutes les fois que le discours évoque un événement du passé ou situe un événement dans le futur.

Ces remarques, venant après tant d'autres auxquelles notre analyse a donné lieu, mènent tout droit, nous semble-t-il, au problème que nous allons maintenant traiter : celui de la constitution du sens, ne disons pas univoque, mais unifié, d'un texte *situé*.

Mais qu'il soit bien entendu, avant de passer à cette nouvelle étape de notre étude de la langue et de l'expression temporelle, que nous ne pensons pas avoir fait le tour de *tous les temps* qu'une analyse encore plus complète de la langue pourrait révéler.

4. La synthèse discursive ou le discours comme milieu synthétique

Plusieurs fois déjà nous avons mis le doigt sur la difficulté qu'il y a à dégager des acceptions pures. Nos meilleurs exemples sont ceux où l'on relève une concurrence ou un accord de plusieurs acceptions. En particulier, la plupart de ces exemples établissent une relation entre de telles variantes et n'ont même de signification que du fait de cette relation. Il est vrai que l'analyse parvient à détacher les unes des autres tout un éventail d'acceptions, mais si elle peut les distinguer, elle ne les établit pas pour autant dans une parfaite pureté. Le langage ne se sert pas naturellement des acceptions prises isolément. Il est « texte » au sens fort de ce mot. Il ne lie pas des significations toutes faites d'avance. La façon les mots y sont intégrés contribue à « moduler » leur sens.

Mais il y a plus, et cette constatation est décisive : l'analyse ne fait pas ressortir, au-delà des acceptions qu'elle sépare, un sens premier, un sens propre, dont tous les autres seraient dérivés, soit par particularisation ou par réduction, soit par figuration ou par modulation. Ainsi, un texte auquel s'intègrent différentes acceptions de la temporalité ne rapporte pas ces dernières à un sens propre et donné d'avance de la temporalité, ce texte fonde un sens global que l'analyse ne peut rendre à elle seule. Une analyse qui prétendrait le saisir ne pourrait que le défaire.

Considérons l'exemple suivant qui fournira une confirmation de la dernière remarque :

Nos beaux jours, ce temps qui les donna, ce temps qui les efface ne nous les rendra plus.

L'intention de ce texte n'est pas explicative ; elle porte sur notre être [79] émotionnel. C'est pourquoi une analyse qui visera à dégager à les variantes de la temporalité qui s'y trouvent liées n'en rencontrera pas le sens réel, qui est global. Elle en

fera un milieu d'analyse discursive qui lui donnera une réalité secondaire et factice qui ne répond pas à l'intention poétique.

Nous allons cependant procéder à cette analyse qui nous éclairera sur ce que *nous* avons en vue.

Voyons se dénouer les unes des autres les variantes de temps comprises dans ce texte.

Le mot *jours* évoque un temps du monde et un même un temps déjà mesuré par la succession régulière des jours. Mais cette variante est évidemment modulée par l'adjectif qualitatif *beaux* et l'adjectif possessif *nos*. Le premier réalise déjà la transposition du temps du monde en temps du moi, plus précisément en temps ressenti comme beau. L'adjectif *nos* va jusqu'à l'identification de ce temps du monde et de ce temps du moi, devenu propriété de notre être. Mais c'est plus loin dans le texte que nous rencontrons la variante principale, le temps actif, qui donne, qui efface, qui ne se rend plus. C'est le temps dispensateur de durée, durée qui peut s'identifier ici à l'existence.

A ces variantes se superpose d'ailleurs un moment d'imagination.

On le voit bien, aucune acception n'est parfaitement pure, aucune ne représente un sens premier, un sens propre à la temporalité de ce texte. De plus cette analyse ne touche en rien notre être émotionnel, et par conséquent, le sens réel et poétique de ce fragment, sens que nous avons nommé global, lui échappe. Le langage n'opère pas à coups de sens propres et de significations bien tranchées qu'il combinerait sans les altérer. Par le jeu des significations liées par un texte, le langage opère une synthèse discursive qui produit des sens globaux.

Portons maintenant notre attention plus précisément sur la mise en rapport synthétique, dans le langage, du subjectif et de l'objectif. Nous nous apercevons que le fait discursif réalisé dans le langage courant prend immédiatement une valeur existentielle pour celui qui se sert du discours. Reprenons dans cette vue la série de nos exemples.

Nous avons déjà noté l'interaction du subjectif et de l'objectif dans l'interprétation du fragment qui précède. L'exemple qui suit lui est assez semblable bien que plus bref : *Hâtons-nous, le temps fuit*.

Il semblerait d'abord que le temps qui fuit est proprement cosmique, mais la phrase contient aussi une allusion, dramatique, au temps que nous avons à vivre. Il n'y a aucune raison, si ce n'est les raisons de notre analyse, de séparer les deux parties de la phrase et de les considérer chacune pour soi, munies de leur signification différenciable. Car la signification du texte est faite de leur liaison et ne se répartit pas dans *hâtons-nous* et dans *le temps fuit*. Elle tient au contraire à un retentissement de l'un sur l'autre. [80] On voit ainsi s'esquisser, même dans un exemple aussi bref, l'activité synthétique du langage, qui ne consiste nullement en une juxtaposition des significations, mais qui les fait interagir et retentir les unes sur les autres.

Cherchons maintenant à éprouver nous-mêmes en quoi consiste ce retentissement, pour celui qui s'exprime, de l'une des parties de la phrase sur l'autre. C'est que le temps du monde qui fuit est identifié au temps qui nous est imparti. Il y a donc liaison jusqu'à l'identité entre le moi et le monde, et c'est par cette liaison que, dans le monde, le moi est entraîné vers son destin. L'acuité du sens que la phrase entend revêtir tient donc essentiellement à la possibilité que le langage comporte d'opérer une étroite synthèse entre le subjectif et l'objectif.

Considérons encore les deux exemples suivants : *Les heures m'ont paru brèves et J'ai revécu par la pensée ces interminables minutes d'attente.*

Nous ne les soumettons pas à la même analyse que précédemment. Nous ne pourrions que nous répéter, au moins pour ce qui est de la mise en évidence des différentes acceptions de la temporalité. C'est plus spécialement nous l'angle de la mise en rapport du subjectif et de l'objectif que ces deux exemples doivent être envisagés à nouveau. L'un et l'autre renouvellent pour le moi l'impression qu'il garde d'un événement vécu dans le passé. C'est là précisément l'essentiel de ce que nous avons appelé leur sens global. Or, il est clair que ce sens ne se développe que par l'effet d'une liaison entre le moi – et même le moi qui se reprend en conscience – et l'événement dans lequel le moi se projette. Ainsi, dans le deuxième exemple, le moi projette son état d'attente interminable dans les minutes d'un temps extérieur. Dans le premier exemple, le moi situe la brièveté du temps ressenti dans ce qu'il sait par ailleurs être des heures d'horloge.

Ce qui est ainsi dit ne saurait l'être si nous ne disposions pas à la fois de variantes subjectives et de variantes objectives de la temporalité. En somme, la mise en rapport dont il s'agit, par le moyen des temps du moi et des temps du monde, appartient tout naturellement au discours dans lequel le moi s'exprime. En particulier, le langage opère une synthèse de l'objectif et du subjectif, ne les contient que pour les faire interagir, et ce fait entre autres mérite un commentaire.

Cette synthèse du moi et du monde dans le langage courant n'a rien de surprenant. Seul celui qui croit aux acceptions pures devraient s'en étonner.

Toute notre vie tient à notre insertion, comme personne agissante et pensante, dans le milieu de notre activité. Celle-ci n'est d'ailleurs possible que si elle est guidée par un juste rapport des catégories subjectives aux catégories objectives. Il faut que le monde puisse se projeter dans le sujet, de même que le sujet doit pouvoir s'insérer dans le monde. C'est précisément [81] le propre de l'imagination de projeter le moi dans le monde et le monde dans le moi. Il n'y a pas de moi qui n' imagine que du moi.

Cela encore une fois n'est pas étonnant. Il y a pourtant quelque chose de surprenant, en un certain sens. C'est que le langage ne soit pas seulement le résultat de cette intégration du moi au monde, mais qu'il en soit aussi l'un des moyens les plus efficaces. Ainsi, le discours, du moins pour ce qui est de la temporalité, a la capacité de réaliser l'accord du moi et des choses par la mise en rapport ou l'opposition des différentes acceptions. La liaison syntactique des significations est plus qu'un simple fait grammatical ; elle tient aussi, plus qu'à la seule structuration du langage aux possibilités qui nous sont données d'exister réellement dans le monde. (...) [82] Ce que nous cherchons à faire comprendre, c'est que l'activité discursive qui constitue les sens globaux a tous les caractères d'une synthèse dialectique au niveau du discursif. Lorsqu'on dit que *le temps nous est mesuré*, l'analyse pourrait retrouver sous le mot *temps* plusieurs des acceptions que nous avons différenciées : le temps du moi, existentiel et conscientiel, le temps du monde, qui fuit et qui est mesuré. Le discours renonce ici à opérer des distinctions. Il confond les sens pour les

identifier sous le même mot et c'est par là qu'il donne à la phrase son sens irréductible et synthétique.

(...) Nous avons noté l'absence d'un sens premier de la temporalité dont toutes les autres acceptions participeraient et dont elles pourraient être dérivées. L'inexistence de ce sens premier posait un problème, celui de l'emploi légitime et lié des acceptions prises individuellement et dans leur rapport réciproque. Nous avons maintenant la réponse à cette question : le rôle de ce sens premier hypothétique, c'est la synthèse dialectique au niveau du discursif qui l'assume.

Livre II. Le temps dans la connaissance exacte

Chapitre 1. Le temps mathématique²

7. Rôle du continu arithmétique [155]

(...) Allant droit au fait, nous poserons donc comme acquises l'existence de la structure d'ordre que nous avons en vue en même temps que la possibilité de la repérer de la façon la plus fidèle par le continu arithmétique. Cela fait, rien ne nous empêche de revenir au continu géométrique d'une part, au continu temporel d'autre part. On retrouve le premier en imaginant que les éléments de la structure soient « réalisés » par des points précis, par l'ensemble des points portés par une droite. L'idée du point géométrique se prête à cette réalisation, celle d'un lieu d'une certaine étendue, si exiguë fût-elle, ne s'y prêterait pas. De façon tout à fait analogue, on peut réaliser les éléments de la structure abstraite par des instants précis, et la relation d'ordre qui en fait un tout par la relation que nous sommes capables d'imaginer entre deux instants précis dont l'un viendrait [156] *après* l'autre. On amène ainsi à l'existence mathématique le continu temporel qu'est l'ensemble des instants précis doté de sa relation d'ordre, de sa métrique et du groupe continu de ses applications sur lui-même ; ce continu est l'étoffe même du temps des mathématiciens. Il figure l'extension dont le repérage arithmétique permet de faire une grandeur mesurable.

8. Il ne s'agit pas d'une spatialisation du temps

La façon dont nous venons de présenter les choses n'est-elle pas trop détournée ? N'aurait-il pas été beaucoup plus simple et beaucoup plus facile de définir la variable t comme on définit une abscisse x sur un axe de coordonnées ? Certes,

² Ce premier chapitre analyse la construction de l'ordre temporel à partir des structures d'ordre en géométrie et arithmétique. Cette construction repose sur notre capacité d'abstraction qui établit une relation d'analogie entre les deux ordres temporel et mathématique. Elle conditionne la possibilité du chapitre suivant dédié à la mesure du temps.

tous les résultats que nous avons établis, de la relation d'ordre au groupe des applications de l'axe t sur lui-même et à l'équation fondamentale

$$t' = t + t_0$$

se seraient offerts d'eux-mêmes de la façon la plus élémentaire. Mais nous aurions donné prise à l'opinion tout à fait erronée et cependant si répandue selon laquelle la mathématisation du temps en est la géométrisation. Notre façon de procéder met le continu temporel et le continu géométrique du mathématicien au même niveau d'abstraction. Ce sont deux réalisations d'une même structure d'ordre. On peut les représenter l'une par l'autre, mais la spécificité de l'une n'est pas réductible à celle de l'autre. L'habitude qu'a prise le mathématicien de tracer, dans nombre de questions, un axe des t perpendiculaire à un axe des x n'y change rien. A un certain niveau d'abstraction, le continu temporel et le continu linéaire ne sont qu'une seule et même structure d'ordre ; réinvesties de la signification qu'elles prennent du fait de leur intervention dans la prise de connaissance du monde réel, la durée et la distance du mathématicien sont deux notions irréductibles l'une à l'autre.

9. Multiplicité des modèles possibles

La construction du continu temporel à laquelle nous venons de procéder donne lieu à une remarque d'une certaine importance et même d'une certaine difficulté. Cette remarque prépare l'intervention du « temps lié aux représentations du monde en nous », auquel nous ne pourrions éviter d'avoir recours, tout au long de l'étude du *temps mesuré* qui va suivre. Cette remarque ne prendra cependant toute sa portée qu'au moment [157] où nous analyserons le *temps intuitif*, la troisième des grandes variantes unificatrices de notre conception du temps, au moment surtout où nous serons mis dans l'obligation d'établir un rapport de synthèse entre ces trois variantes.

Nous venons donc de réaliser un modèle abstrait de l'ordre temporel. C'est un continu linéairement ordonné, porteur d'une métrique et d'un groupe de transformations en lui-même – les transformations de ce groupe laissant la métrique invariante. Chacune des transformations de ce groupe correspond à un déplacement de l'origine des temps vers le passé ou vers le futur.

Il nous faut maintenant insister sur le fait que cette réalisation n'est pas unique, n'est pas la seule possible. Opérant au sein du premier modèle, la procédure constructive dont nous nous sommes servis conduit naturellement à un second modèle, en général différent du premier, mais également porteur d'une métrique et d'un groupe de transformations en lui-même. Ces deux modèles ont la même structure, on passe de l'un à l'autre par une certaine transformation topologique du premier modèle en lui-même (d'une transformation qui n'en altère pas l'ordre et n'y produit aucune lacune). En donnant à la procédure constructive toute la liberté dont elle est capable, c'est donc une infinité de modèles équivalents qu'elle engendre, chacun d'eux pouvant être obtenu par une transformation

topologique du premier modèle en lui-même. Rien, dans ce que nous avons dit jusqu'à maintenant, ne nous permet de conférer un rôle privilégié au premier de ces modèles ; tous les autres sont également admissibles. Si nous avions des raisons de le faire, nous serions libres d'en choisir un autre, à notre gré, dans l'infinité de tous ces modèles possibles.

10. Existe-t-il un modèle privilégié ?

Il est cependant une question qui se pose. Ces modèles sont-ils équivalents entre eux et à *tout* point de vue ? Ne pourrait-il se faire que, dans l'ensemble de tous les modèles ainsi construits, il en existe un qui puisse être distingué de tous les autres, de tel ou tel point de vue particulier, d'un point de vue que même un mathématicien puisse tenir pour valable ? Ne met-on pas un modèle en évidence lorsqu'on se propose de représenter la variable temporelle t par une variable x , ayant valeur de coordonnée sur une droite, lorsqu'on se propose, en d'autres termes, de représenter des durées égales ou inégales par des segments de longueurs respectivement égales ou inégales ?

(...)[158] La réponse ne fait aucune doute, elle est affirmative. Nous portons en nous, dans notre univers mental, une idée de la droite qui peut être regardée comme l'original dont tous les modèles dont il vient d'être question ne sont que des imitations. La droite dont l'image est naturellement en nous est aussi porteuse d'un continu, d'une métrique et d'un groupe de translations. Mais ce qui la distingue de ce que nous venons d'appeler ses imitations n'est pas saisi par la procédure constructive. Celle-ci ne retient pas ce qui fait sa singularité. Ce qu'aucun modèle structurel de la droite ne contient plus, c'est, pour ne prendre qu'un exemple, la forme sous laquelle nous nous représentons un segment de droit, avec la longueur qui lui est propre, cette forme que notre esprit élabore à partir de nos impressions sensorielles. (...)

[162] Chapitre II. Le temps mesuré

En conduisant, au chapitre premier du livre II, l'idée du temps son achèvement mathématique (le mot d'achèvement ne demande d'ailleurs pas à être pris dans un sens trop absolu), notre intention restait double : d'une part, nous agissions en mathématicien soucieux de bien établir la structure du continu temporel ; mais, d'autre part, nous entendions ne pas perdre de vue que la constitution du temps mathématique n'est pas un but en soi, qu'elle ne pouvait, à elle seule, résumer l'ensemble des significations que le mot temps avait déjà prises pour nous. En nous, le mathématicien restait au service d'une intention méthodologique qui visait plus loin que lui.

Nous allons maintenant examiner comment les variantes objectives du temps que nous avons mises à découvert dans le langage courant peuvent être reprises et engagées dans une autre spécification, dans une spécification unificatrice, que, par commodité, nous nommerons le temps mesuré ou le temps du physicien. Cette fois encore, notre intention restera double. D'une part, nous nous efforcerons d'entrer

dans les vues et dans les préoccupations de celui qui envisage le problème du temps sous son angle pratique, de celui qui se propose, non de définir le temps, mais de le mesurer, c'est-à-dire de construire un instrument ou même une série d'instruments capables d'en effectuer la mesure avec une certaine précision.

Mais s'il nous paraît indispensable de suivre d'assez près le technicien de la mesure du temps pour apprendre de lui comment il résout son problème, nous ne pourrons jamais nous identifier complètement avec lui. Il ne fait que dégager l'un des éléments de *notre* problème : si près que nous soyons de lui, notre intention la plus valable devra toujours le dépasser. Nous ne saurions nous passer de lui, mais il n'est pas le seul dont nous ayons besoin : nous l'avons déjà dit, le point de vue du mathématicien nous est tout aussi nécessaire.

Nous nous livrons pour l'instant à un travail de spécification. Pour acquérir une connaissance qui dépasse le contenu d'information du langage courant, il faut être en possession de certaines variantes à la fois [163] précisées et précisantes, unifiées et unifiantes de la notion de temps. Le temps du mathématicien et le temps du physicien en sont les deux premiers exemples. Nous aurons à leur adjoindre encore une troisième variante, celle du temps intuitif. La question devant laquelle nous nous trouverons alors sera celle de leur mise en rapport, de l'appui qu'elles devront mutuellement prendre l'une sur l'autre dans la pratique de la recherche. (...)

[183] §19. Dialogue du temps mesuré et du temps mathématique

Revenons maintenant à la « définition opérationnelle du temps » dont notre premier instrument [le sablier, *nde*] nous a fourni l'occasion. C'est l'aspect expérimental de l'opération que nous avons cherché jusqu'ici à mettre en valeur. Est-il possible d'y retrouver les conditions d'un dialogue semblable à celui du dessinateur et de l'architecte ? Il nous faudrait alors admettre que, [184] jusque dans les procédures les plus élémentaires, l'aspect expérimental de « l'opérationnel » ne peut pas être rendu totalement autonome, mais qu'il est inséparablement lié à une mise en forme où l'activité mentale prédomine. Ce n'est, d'ailleurs, pas la première fois que nous relevons les traces d'un principe de dualité susceptible de rendre compte du fait au niveau d'une méthodologie de la recherche. A peine indiqué à cet endroit, ce principe sera, par la suite beaucoup plus nettement dégagé.

L'attention ainsi éveillée, examinons à nouveau la façon dont nous avons institué la mesure d'un temps en voie d'objectivation. Nous ne reprendrons pas tout le détail des opérations envisagées ; il nous suffira de revenir sur le résultat qui les résume toutes, sur la possibilité de construire et d'utiliser une échelle temporelle. Nous pouvons nous dispenser d'en traiter à nouveau l'aspect de « fabrication », nous l'avons suffisamment mis en évidence. C'est l'aspect d'énonciation qui doit sortir de l'ombre où nous l'avons laissé.

Quel est donc l'aboutissement de tout l'effort expérimental ? Nous n'en prendrons véritablement possession qu'en l'énonçant : l'échelle imprime sa structure au temps qu'on mesure. De façon plus explicite, le temps mesuré est linéaire, additif, homogène. Il peut être mesuré, identique à lui-même à partir de tout instant déterminé : il suffit, pour le faire, de se servir deux échelles égales, dont l'une

sera convenablement déplacée le long de l'autre. En un mot, l'échelle se présente comme une réalisation, manquant peut-être encore de précision, du temps abstrait du mathématicien. (Nous ne faisons intervenir ici le temps du mathématicien que pour abrégier l'énonciation des propriétés de l'échelle temporelle. A cet endroit, il nous aurait encore été possible de nous en passer, mais il nous aurait fallu y revenir plus tard.)

Voilà donc, en raccourci, les énoncés (les formes verbales énonciatrices) qui viennent s'installer en face de l'activité expérimentatrice qui résume celle-ci et lui confère le plus clair de sa signification. Mais vaut-il la peine de les mettre en lumière ? Ne sont-ils pas l'expression toute simple et toute nécessaire des résultats obtenus du côté de l'expérimentation ? Ce serait une assez grave erreur d'en juger ainsi. Les énoncés ainsi formulés n'ont, nous l'avons déjà vu, qu'une validité sommaire. Ils n'ont donc, pour reprendre notre comparaison, que la valeur d'une esquisse. D'un coup, la situation s'éclaire de tout ce que nous avons dit du dialogue du dessinateur et de l'architecte. Il y a, entre l'énonciation et l'expérimentation qui se partagent les rôles dans notre exemple (tout élémentaire que soit ce dernier), une interdépendance, une dualité semblable à celle qui fait un tout de l'esquisse et de l'édifice réel.

Si claire que la chose puisse être, il est cependant un point qui mérite encore attention. (...) [185] L'énonciation qui figure dans notre exemple l'une quelconque des énonciations possibles ou est-ce une énonciation privilégiée ? La chose ne fait aucun doute. C'est une énonciation privilégiée. C'est là ce que nous voulions déjà faire entendre, il y a un instant, par notre allusion au temps du mathématicien. Elle nous est suggérée, imposée, sinon par la conception du temps mathématique épuré, du moins par les représentations dont le langage courant est déjà le porteur et qui ont trouvé leur aboutissement sur une certaine ligne de spécification, dans le temps mathématique. (...)

§20. L'objectivité du temps

Chacun des exemples traités doit nous permettre, avons-nous dit, de faire porter la discussion sur un thème d'une certaine portée méthodologique. A première vue, notre second exemple différera peu du premier. A le mieux examiner, nous verrons cependant qu'il est fondé sur un tout autre principe. C'est précisément là ce qui va nous fournir l'occasion de nous poser la question de l'objectivité du temps mesuré, question déjà effleurée, mais qu'il convient de traiter plus à fond.

La durée d'écoulement du sablier, d'un sablier, s'est tout d'abord présentée comme une propriété de *ce* sablier. Si chaque sablier ne devait mesurer que son propre temps, indépendamment du temps de tout autre sablier, nous ne dirions pas, nous ne pourrions pas dire que le temps peut être objectivement mesuré. Pour qu'il y ait mesure objective (pour qu'il y ait un sens à parler d'une mesure objective), il ne suffit pas que les observations faites sur tel ou tel instrument soient indépendantes des fluctuations de l'état personnel de l'observateur. Comme une condition minimum, les choses doivent se présenter comme si tous les instruments mesuraient le même temps, si différentes soient les façons de le mesurer. (La si-

gnification du « *comme si* » qui vient d'être soulignée sera reprise et précisée dans quelques instants.)

En bref, le signe de l'objectivité de la mesure du temps c'est, ce doit être son universalité. Ce doit être que, quels que soient les instruments envisagés et quels que soient les phénomènes utilisés pour les réaliser, leurs échelles temporelles puissent être durablement synchronisées.

[185] Mais comment pourrions-nous établir cette universalité de la mesure ? Par voie expérimentale ? On ne réalisera jamais, la chose est claire, tous les instruments que le recours à tous les phénomènes possibles permettrait de construire³. Le pourrait-on qu'on ne le ferait pas. L'universalité, garantie d'objectivité, n'est donc pas directement démontrable. Quelle est donc la méthode par laquelle elle sera finalement assurée ?

En stricte logique, elle ne le sera jamais totalement. Mais elle le sera suffisamment au même titre et au même degré que tous les résultats obtenus par voie expérimentale. La méthode prendra la forme d'une procédure d'extension. Elle a déjà débuté au paragraphe précédent : nous n'y avons pas confié à la mesure du temps à un seul sablier ou à une seule clepsydre élémentaire, nous y avons envisagé de nous servir d'un ensemble de sabliers *et* de clepsydes construits en s'attachant de moins en moins à leurs ressemblances matérielles, à l'égalité de leurs formes, à l'identité des matériaux utilisés – et, de plus en plus, à l'équivalence de leurs fonctions, c'est-à-dire à la synchronicité de leurs échelles. Ainsi, nous obtenions déjà que la mesure juste du temps ne soit pas la prérogative d'un instrument déterminé, ni d'une batterie d'instruments aussi semblables entre eux que possible : en mettant l'accent sur l'équivalence de la fonction, équivalence réalisable en dépit de toutes les différences de forme, nous faisons un premier pas vers l'universalité et par conséquent vers l'objectivité de la mesure du temps.

Nous n'avons qu'à persévérer dans la même voie, en multipliant les exemples et en faisant subir des variations de plus en plus profondes à l'instrument. A chaque fois qu'un instrument nouveau aura été intégré à l'ensemble des instruments déjà existants et surtout s'il fait appel à un phénomène non encore utilisé, nous aurons fait un pas de plus, non seulement vers l'objectivation de la mesure du temps,

³ Il faut cependant remarquer que, même si l'on ne construit pas des horloges basées sur ces phénomènes, on cherche cependant à établir leur loi temporelle. Et lorsqu'on dispose de la loi temporelle d'un phénomène, rien n'est plus facile que d'établir des tables permettant de l'utiliser comme horloge. C'est exactement ce qu'on a fait pour établir le temps des éphémérides, comme nous le verrons dans un prochain chapitre.

^{On} objectera peut-être qu'ici on prend l'horloge comme norme et que jamais le savant n'a l'idée de vérifier son horloge à l'aide du phénomène qu'il étudie. – c'est peut-être vrai tant qu'il n'étudie pas un phénomène plus constant et plus précis que son horloge. Mais si ce cas se présentait, si la loi du phénomène devenait de plus en plus simple, de plus en plus précise au fur et à mesure qu'on utilise de meilleurs horloges, l'idée de prendre ce phénomène comme nouvel étalon ne s'imposerait-elle pas irrésistiblement à lui ? – L'établissement de la loi temporelle des phénomènes peut donc être considéré lui aussi comme une consolidation opérationnelle du temps fourni par l'horloge prise comme référence. (La portée méthodologique de cette remarque ne se révélera qu'au moment où nous aborderons le thème de l'autofondation d'une discipline.)

mais aussi vers [187] l'objectivation du temps lui-même. Quand cette procédure d'extension aura-t-elle atteint son terme ? En principe, jamais. En pratique, il y a une mesure à garder. Il n'y a aucun intérêt, dans une situation de connaissance déterminée, à augmenter indéfiniment les possibilités de contrôle, de synchronicité.

Mais de quel droit, demandera-t-on, arrêterait-on là la procédure d'extension ? Si l'on n'admet pas l'existence d'un temps objectif et universel, n'y a-t-il pas une faute de méthode à poser que les contrôles de synchronicité qu'on aura déjà faits sont capables de garantir ceux qui n'ont pas encore été faits ? Est-il admissible d'exclure comme impossible le cas d'un instrument encore « inédit » qui ne se laisserait pas intégrer sans autre à l'ensemble des horloges en usage ?

Nous avons déjà répondu indirectement à cette question : il n'est pas nécessaire de construire toutes les horloges possibles ; il suffit d'établir la loi temporelle des phénomènes. Tant que cette loi temporelle ne varie pas selon le moment où se déroule le phénomène (cette variation ne pouvant bien sûr être attribuée à aucune influence momentanée, ni à aucune évolution plus ou moins cachée du système qui est le siège de ce phénomène), nous n'avons aucune raison d'abandonner l'hypothèse d'un temps universel et chaque phénomène dont la loi ne varie pas au cours du temps vient confirmer cette hypothèse. Que pouvons-nous exiger de plus d'une loi naturelle ?

[264] Chapitre III. Le temps intuitif

1. Introduction

En complément des deux grandes variantes de la notion du temps que nous nous sommes efforcé de préciser, de spécifier, nous allons maintenant chercher à en mettre une troisième en évidence, celle du *temps intuitif*. Est-ce la première fois que nous en parlons ? Nous y avons fait, au contraire, de fréquentes allusions, aussi bien au cours de l'analyse du temps mathématique que de celle du temps mesuré. A dessein, nous l'avons cependant maintenu à l'arrière-plan : le moment est maintenant venu de le mettre plus nettement en lumière.

Après avoir abstraitement construit la structure qui doit être conférée au temps mathématique, nous avons déjà remarqué que cette construction représente à la fois un gain et une perte par rapport au temps conscientiel, au temps dont le déroulement est une donnée de la conscience (et dont l'imagination sait ensuite se saisir). Le gain, c'est que le temps mathématique assure et précise le temps de l'imagination, qu'il en assure la cohérence, qu'il en précise la structure. La perte, nous nous étions déjà attaché à faire saisir, c'est que le temps ainsi « épuré » laisse échapper un certain élément de représentation, une certaine « forme » que le temps a pour nous lorsqu'il est le temps de notre propre existence.

D'autre part, en analysant les variantes que le langage courant comporte, dont il sait se servir, en faisant plus ou moins nettement appel tantôt à l'une tantôt à l'autre, nous avons remarqué que dans l'une de ses variantes le temps se présente comme une durée, subjectivement ressentie, comme une durée consciemment vécue, tandis que dans une autre, il désigne le temps que met un événement à s'ac-

complir, indépendamment de nous et de la connaissance que nous pourrions en avoir ; tandis qu'une autre encore évoque le temps de l'imagination, le temps dont l'imagination est capable de dérouler un siècle en quelques minutes ou même en quelques secondes.

2. Le temps intuitif, forme d'arbitrage

Le temps intuitif dont nous voulons maintenant parler n'est ni tout à fait l'une ni tout à fait l'autre de ces variantes que notre analyse s'est efforcée de distinguer, de séparer l'une de l'autre, autant que faire se peut. Il faut le concevoir comme un temps synthétique au niveau du sens commun, comme un temps d'arbitrage entre les variantes précédentes aux fins d'une activité efficace comme l'est notre activité quotidienne. Il doit être interprétable comme un temps ressenti, mais comme un temps ressenti dans sa juste durée, et non dans la durée plus ou moins brève ou plus ou moins longue que la conscience accorde, selon son climat émotif, à un événement déterminé. Il comporte un aspect d'objectivité, mais ce n'est pas encore l'objectivité qui pourrait lui être conférée par l'intermédiaire de la mesure, ce n'est encore que celle que sait lui reconnaître une conscience attentive à « être bien présente au monde ». Enfin, il peut être aussi repris par l'imagination, mais celle-ci renonce à la liberté de le déployer en une représentation capable de s'allonger ou de se rétrécir ; elle lui donne sa forme idoine, la forme sous laquelle il est en mesure d'être lié aux autres formes du monde en nous, aux autres représentations que nous savons faire des « réalités du monde ».

En bref, le temps intuitif est le résultat d'un arbitrage dont la conscience semble être le siège entre l'autorité du sentiment, la liberté de l'imagination et l'objectivité de la perception aux fins d'une action efficace⁴.

3. Rapports avec le temps mathématique

Le temps mathématique, tel que nous l'avons précisé, réduit à sa structure d'ordre, s'est donc, en une certaine mesure, dégagé de la forme intuitive dont nous venons de parler. Rappelons la remarque que nous avons faite à ce propos : si nous l'avions trouvé bon, nous aurions pu fonder axiomatiquement l'ordre temporel à un niveau moins abstrait, en ne renonçant pas à la forme *sui generis* qu'il revêt dans la représentation intuitive que nous nous en faisons. Deux façons de faire tout à fait analogues nous sont offertes en géométrie. On peut, si l'on veut, définir axiomatiquement un ordre linéaire sur une droite, sans renoncer à l'élément de forme qui est inséparable de toute droite dans notre représentation intuitive de l'espace. Mais on peut aussi se défaire, au moins partiellement, de cet aspect intuitif et définir une variable x sur une droite, en ne retenant que la structure d'ordre de celle-ci – exactement comme nous l'avons fait pour la variable temporelle t .

⁴ Voir J.-P. Gonthier, *Théâtre de veille et théâtre de songe*. Editions du Griffon, Neuchâtel, 1950.

[266] 4. Analogie géométrique

C'est d'ailleurs dans cette stricte analogie que se fonde la possibilité de représenter le cours uniforme du temps par la progression uniforme d'un point sur une droite. Il ne faut cependant pas exagérer la portée de ce modèle géométrique. Au niveau où cette spatialisation du temps nous devient consciente, elle n'est plus qu'un artifice scientifique. Au niveau des représentations intuitives, l'ordre temporel et l'ordre linéaire, ont, chacun pour soi, une spécificité qui ne permet pas de les identifier. Quel rôle le temps intuitif a-t-il joué dans l'étude de la mesure du temps, dans la spécification du temps mesuré ? Ce rôle est tout à fait fondamental. C'est même pour le mettre bien en évidence que nous nous sommes arrêtés si longuement à l'étude des dispositifs de mesure les plus élémentaires, aux clepsydres, par exemple. A maintes reprises, il nous a fallu constater que celui qui entend fabriquer et utiliser ces instruments n'a pas d'autres garanties de leur justesse et de leur efficacité que certaines de ses représentations naturelles. C'est ainsi, par exemple, que l'uniformité de l'écoulement de l'eau qui sort de la clepsydre est garante de l'uniformité de l'écoulement du temps. C'est à une série de représentations de ce genre qu'il nous a fallu avoir recours pour donner une certaine autonomie à l'idée d'un temps opérationnel. Toutes ces représentations sont elles-mêmes liées à la représentation du cours uniforme du temps. En bref, à cet égard, et à bien d'autres encore, le temps intuitif enveloppe tout ce que pense, dit et fait celui qui se propose d'instituer une mesure du temps.

Tout à l'heure, nous faisons allusion à la stricte analogie qui permet de représenter la variable t par une coordonnée x portée sur une droite.

A condition de ne pas passer trop légèrement sur certaines différences, il peut être utile d'approfondir cette analogie. Dès qu'on se propose de dépasser la connaissance de l'espace qui s'exprime dans le langage courant, et dont notre activité quotidienne témoigne, c'est également sous la forme de trois variantes principales que cette connaissance se précise. La géométrie, discipline déductive, lui confère son aspect mathématique, les procédures de mesure l'engagent dans son aspect expérimental, et la vision que tout homme a naturellement de l'espace-étendue lui assure son caractère intuitif. Nous ne pouvons songer à montrer ici comment ces trois aspects peuvent être à la fois séparés l'un de l'autre de façon à ne plus pouvoir être confondus et rester cependant liés l'un à l'autre, associés dans une synthèse que la recherche recrée chaque fois qu'elle se « spatialise ». Même lorsqu'elle cherche à s'écarter de la vision intuitive de l'étendue, la démarche géométrisante s'y fonde, y conserve son appui. Même lorsqu'elle cherche à gagner en autonomie opérationnelle, c'est dans nos [267] représentations naturelles que l'intention de mesurer trouve son premier guide et ses premières garanties. Comme pour le temps, la variante intuitive de l'espace continue à en envelopper, à en soutenir les variantes rationnelles et opérationnelles, même lorsque celles-ci s'en dégagent et s'en écartent.

15. (...) [284] Faut-il penser que chaque fois que le temps intervient en tant qu'élément ordinateur de notre activité, la tâche se partage toujours de la même façon entre une composante intuitive (phénoménologique), une composante mathématique et une composante technique ? On s'engagerait dans une nouvelle erreur en admettant qu'il y ait là quelque chose comme un tout à partager statiquement

entre ces parties. Ni l'une ni l'autre de ses composantes n'est donnée comme une chose toute faite. La composante technique est en constant progrès, l'idéalisation mathématique qui l'accompagne et parfois la précède se renouvelle périodiquement et les représentations intuitives elles-mêmes évoluent sous la pression de l'expérience dans laquelle elles sont entraînées. Les trois aspects se trouvent être solidairement l'objet d'un effort de construction, d'invention et d'analyse, qui, sans avoir le pouvoir de les séparer totalement, les précise cependant et réussit par là à affermir leur spécificité relative. (...)

16. (...) Si, dans les instruments les plus simples, le rôle de nos représentations naturelles (de celles qui, bien entendu, figurent pour nous l'écoulement continu du temps) est tout à fait primordial, elles cèdent le pas à un dialogue entre l'idéalisation mathématique et la réalisation technique au fur et à mesure que croissent les exigences de la précision. Jamais cependant nous ne sommes en mesure de renoncer aux garanties qu'elles fournissent à nos activités précisées. Paradoxalement (mais la chose [285] s'explique, on le sait, par une différence d'échelle) il n'en sera pas autrement lorsque ces représentations auront été mises en échec à l'échelle atomique.

Dès maintenant et sans aller plus loin, nous retrouvons donc dans le temps mesuré tous les caractères de ce que nous avons appelé, à propos des grandeurs géométriques, une *synthèse dialectique*. Il y a dialectique, soulignons-le, non pas parce que les éléments qui entrent dans la synthèse s'opposent comme un oui s'oppose à un non, mais parce qu'ils appartiennent à des horizons complémentaires qui, aux fins de l'action efficace, doivent être mis en jeu solidairement.

17. Ce qu'il nous reste à examiner

Notre étude, disions-nous tout à l'heure, n'est pas encore terminée. Mais n'avions-nous pas prétendu qu'elle n'avait pas d'autre but que d'approfondir et de confirmer les vues émises sur la méthodologie et la philosophie ouvertes en conclusion de l'ouvrage *La Géométrie et le problème de l'espace* ?

Or, ce but est atteint, s'il faut en croire ce qui vient d'être dit. Dès lors, pourquoi porter l'effort encore plus loin ? Pour deux raisons, dont la seconde est la plus forte. Il convient tout d'abord d'écarter certains doutes qui pourraient subsister à propos des horloges les plus récentes et les plus précises. Le rôle du physicien y devient prépondérant : le fait n'est-il pas de nature à compromettre les conclusions auxquelles nous nous serions arrêté ? Nous constaterons qu'il n'en est rien. Le thème de la synthèse y prendra même une ampleur inattendue, car une mesure synthétique, une mesure obtenue par la coopération d'horloges de types différents, qui se trouve actuellement à la pointe des mesures de haute précision.

La seconde de nos raisons porte beaucoup plus loin. Que ce soit à propos du temps des éphémérides, du temps des horloges à quartz ou du temps des horloges atomiques, chaque fois nous aurons à passer ce que nous avons déjà un seuil de précision. Et chaque fois nous nous retrouverons devant le même cercle vicieux apparent, celui de ne justifier que par elle-même une façon encore inédite de me-

surer le temps. La façon d'échapper à ce paradoxe méthodologique est toujours la même : elle consiste à aménager les conditions d'une épreuve d'efficacité. Nous ouvrirons ainsi la voie à la procédure d'*autofondation* qui couronnera la méthodologie ouverte en lui incorporant tout d'abord la méthode selon laquelle toute discipline scientifique peut être fondée en discipline ouverte, en lui fournissant ensuite le modèle général selon lequel une discipline ouverte quelconque peut être fondée et, par conséquent aussi, la justification de son propre fondement.

Chapitre IV. Le temps synthétique. [286] §25. Synthèse pragmatique au niveau des temps mesurés [323]

Nous n'avons pas manqué de relever que les trois variantes de la mesure du temps que nous avons traitées sous le titre commun de *Temps* [324] *synthétique* n'offrent pas toutes trois les mêmes avantages. Le temps des éphémérides convient aux longues périodes et fournit alors à long terme un contrôle du temps des horloges à quartz, les horloges à quartz conviennent spécialement aux faibles et moyennes durées, à la condition d'être régulièrement soumises à un contrôle de fréquence par les horloges atomiques. Dans leur rôle d'étalon de fréquence, les horloges atomiques sont irremplaçables. On voit ainsi se « définir », par la collaboration de techniques aussi différentes et aussi diversement fondées que celles dont il vient d'être question, un temps synthétique dont la précision dépasse celle de tous les temps mesurés séparément.

Le fait doit être souligné, car il est de la plus haute importance pour une juste appréciation de ce qui fait l'objectivité de la connaissance :

Ce n'est pas à une dispersion des temps mesurés séparément que leur comparaison conduit, mais à une convergence vers un temps à la fois plus précis et plus largement fondé que chacun d'eux.

Voici d'ailleurs ce que l'Observatoire chronométrique de Neuchâtel écrit à ce propos :

Voici un aperçu chronologique très succinct de la façon dont les problèmes de la mesure précise du temps se sont présentés à nous depuis la construction de nos premières horloges atomiques. Ces quelques indications permettent de comprendre que dans la pratique l'évolution des méthodes et des procédures obéit au souci d'une efficacité croissante.

En 1957, la *seconde* était officiellement définie comme étant une fraction déterminée de l'année *tropique*. Cette définition était encore valable le 1^{er} janvier 1964. L'échelle temporelle correspondante était celle du *temps des éphémérides*. Son origine en est conventionnellement fixée au début précis de l'an 1900 de notre calendrier. La détermination des *instants* se fonde sur l'observation des planètes et de la lune par rapport aux toiles fixes. Pratiquement on obtient des éphémérides en apportant une correction Delta au temps universel déterminé par une méthode antérieure, par celle du passage des étoiles au méridien, par exemple. L'adoption du temps des éphémérides se justifie par le fait que, si on l'identifie à la variable *t*

des équations de la mécanique céleste, on obtient pour le système solaire un meilleur ajustement des observations aux calculs.

L'échelle temporelle ainsi établie comporte cependant un grave défaut : c'est la difficulté et le retard avec lesquels un instant peut y être porté, ainsi qu'une certaine imprécision résultant à la fois de la précision limitée des observations et de l'exactitude imparfaite des calculs par approximations successives.

Lorsqu'en 1957 la possibilité s'est offerte de substituer une échelle temporelle plus uniforme à celle du temps universel antérieur, il y avait aussi en usage des horloges à quartz qui, sur l'intervalle d'une année, éga- [325] laient en précision « l'horloge universelle », étaient meilleures que celle-ci sur des durées plus courtes et moins exactes sur des durées plus longues.

Les premières horloges atomiques furent essentiellement des *étalons de fréquence*. Elles étaient d'une stabilité si précaire qu'il n'était pas question de les faire fonctionner sans interruption dans l'intention d'en compter les oscillations une à une à partir d'une origine déterminée pour établir une nouvelle échelle du temps. On s'est donc servi des horloges à quartz comme de *volant d'inertie* en contrôlant leur fréquence de temps à autre, toutes les heures par exemple, par comparaison avec des fréquences atomiques. En portant les fréquences ainsi obtenues en ordonnées, on obtenait un graphique représentant, en fonction du temps, la variation de la fréquence de telle ou telle horloge à quartz. (La question de savoir quel temps il fallait porter en abscisse était pratiquement sans importance.) En faisant l'hypothèse que les fonctions ainsi obtenues sont intégrables, leur intégrale à partir d'une origine déterminée représente pour chaque horloge à quartz la correction capable de faire du temps de cette horloge ce que nous appelions déjà un temps atomique.

Pour nous la principale justification de ce procédé consistait dans le fait que les temps ainsi corrigés à partir d'horloges à quartz comme volants d'inertie s'écartaient très peu les uns des autres. Nous avons pu démontrer de cette façon que l'erreur introduite par l'utilisation des horloges à quartz comme volants d'inertie était négligeable par rapport aux fluctuations des étalons atomiques eux-mêmes. Nous avons pu en effet déterminer ces fluctuations, ou du moins leur valeur minimale, dès le moment où nous avons disposé de plusieurs étalons dont on pouvait comparer les fréquences. Ici la situation est donc entièrement différente de celle du domaine astronomique : dans ce dernier, le test pour la qualité d'une échelle temporelle est la concordance entre le calcul et l'observation ; pour une échelle physique, le test est la concordance entre les différentes expériences⁵.

Depuis 1957 à ce jour, des temps atomiques établis en utilisant des horloges à quartz comme volants ont été conservés dans tous les laboratoires disposant d'étalons atomiques. Une origine commune leur a été fixée conventionnellement (temps atomique = temps universel au 1^{er} janvier 1958) et une valeur numérique arbitraire a été attribuée d'un commun accord à la fréquence utilisée de l'atome de césium. La comparaison entre elles de ces échelles atomiques, au moyen de signaux radioélectriques, met également en évidence que l'erreur apportée par les horloges à quartz est négligeable par rapport aux autres erreurs de mesure.

⁵ Dans notre perspective, ces deux tests révèlent deux aspects de la procédure d'autofondation.

Depuis 1957, les étalons atomiques ont été très considérablement améliorés : [326]

1° On a tout d'abord construit des horloges atomiques dans lesquelles l'horloge à quartz était incorporée, la marche de celle-ci se trouvant corrigée par un servo-mécanisme de façon à pouvoir indiquer directement l'heure atomique.

2° La stabilité relative des étalons de laboratoire a passé successivement de 10^{-9} à 10^{-10} , jusqu'à 10^{-12} .

Les performances des horloges à quartz ont en outre été suffisamment améliorées pour ces horloges puissent continuer à s'intégrer les fréquences des étalons atomiques sans introduire d'erreur appréciable. Ce n'est que tout récemment qu'on s'est aperçu qu'à la précision de 10^{-12} la fréquence des meilleures horloges à quartz est une fonction discontinue en chaque de ses points.

Tout aussi récemment, nous avons développé d'autres types d'étalons atomiques (*masers* à hydrogène par exemple) qui réalisent un nouveau progrès de principe ; ce sont d'une part des oscillateurs actifs, c'est-à-dire des oscillateurs indiquant leur fréquence à chaque instant ; ils sont d'autre part d'un fonctionnement si sûr qu'ils peuvent rester en activité de façon ininterrompue pendant de longues périodes. D'un seul coup se trouvent ainsi réunies et reprises par les *masers* eux-mêmes les deux fonctions que remplissaient encore l'horloge à quartz pour la détermination de l'heure atomique, à savoir son rôle de fournisseur de signaux et de volant d'inertie.

Une certaine évolution atteint son achèvement. Il n'en reste pas moins que l'emploi combiné des différents types d'horloge, usage correspondant aux moyens dont on dispose et aux fins qu'on se propose, conserve toute sa légitimité. [327]

Archives, Archives, Archivi

Chapitre V. Commentaire méthodologique et conclusions.

A. Autofondation

Nous aurions pu ne pas attendre jusqu'ici pour présenter quelques conclusions méthodologiques concernant la façon dont une science expérimentale exacte peut être fondée.

1. La mécanique classique ne peut être fondée sans instrument de mesure

Prenons l'exemple de la mécanique classique. Si l'on s'en tient à son aspect théorique et, par conséquent, mathématique, elle peut être édifiée déductivement à parti d'un certain nombre de notions fondamentales et de principes de base. Le temps en est nécessairement l'une des notions fondamentales et le principe d'inertie (ou tel autre principe qui lui serait équivalent) l'un des principes de base. Mais le temps n'est pas seulement et simplement la variable t qui figure par exemple dans les équations de Lagrange ; cette variable doit être susceptible d'une interprétation pratique qui en fasse une grandeur mesurable. Il en est d'ailleurs de même

de toutes les autres variables fixant l'état de tel ou tel mécanisme dont on prétend décrire l'évolution. A la question : « Comment la variable t doit-elle être interprétée ? », nous nous souvenons d'avoir entendu répondre ceci : « C'est simplement le temps que vous indique votre montre. » Cette réponse est naturellement insuffisante, car il n'y a pas que des bonnes montres, que des montres marquant le temps avec une indéfectible précision. La réponse aurait donc dû, pour le moins, se nuancer de la réserve suivante : « ...à la condition que vous possédiez une bonne montre. » Il est vrai que l'on n'aurait fait ainsi que provoquer une nouvelle question : « Comment sait-on, comment prouve-t-on qu'une montre est une bonne montre ? » De question en réponse et de réponse en question, c'est finalement le problème de la fabrication même de la bonne montre qui restera posé.

2. Mais la construction de l'instrument fait appel à la théorie

Nous avons vu dans ses grands traits quelle en est la solution. Retenons ceci : le développement de l'horlogerie s'explique par un idéal et par une intention : l'idéal, c'est celui du système oscillatoire isochrone ; l'intention, [328] c'est celle de réaliser matériellement cet idéal au mieux, avec la plus grande précision possible. L'idéal a pris la forme du balancier spiral théorique dans lequel les conditions d'une oscillation parfaitement élastique sont supposées satisfaites. L'intention s'est appliquée à réaliser concrètement ces conditions, allant jusqu'à créer la métallurgie des aciers spécialement adéquats, la métallurgie de l'invar et de ses dérivés. Pour ce que nous voulons maintenant expliquer, il importe de relever que c'est l'étude du balancier spiral théorique qui oriente à la fois l'appréciation des causes pour lesquelles la montre sortie des mains de l'horloger s'écarte encore de son modèle idéal et la recherche des moyens susceptibles d'y remédier. Or l'étude (nécessairement théorique) du balancier-spiral parfaitement isochrone se présente explicitement ici comme une application particulière des lois de la mécanique classique en tant que discipline déjà constituée. En bref, la fabrication d'une bonne montre se révèle ainsi doublement fondée : dans la connaissance et dans l'application, d'une part, des lois de la mécanique classique, et, d'autre part, dans la recherche expérimentale et dans l'essai des matériaux et des procédés les meilleurs. Il est donc clair que la montre qu'on consulte ne fournit pas, à celui qui entend expliquer comment la mécanique se constitue en discipline à la fois cohérente et efficace, une interprétation antérieurement fixée de la variable t , une interprétation assurée sans le concours de la mécanique elle-même.

Tenant compte de cette constatation, il faut donc dire que, par l'intermédiaire de la montre telle qu'elle se fabrique réellement, et pour ce qui concerne le temps, la mécanique est *auto-fondée*. La remarque qui précède jette une lumière assez imprévue sur le problème du fondement d'une discipline qui entend être à la fois, comme nous l'avons déjà dit plus haut, cohérente et efficace. (Par discipline « efficace », nous entendons une discipline applicable avec succès, avec un succès répondant à certaines exigences de précision, dans tel ou tel secteur de nos activités.) On sait bien maintenant, pour en avoir rencontré tant d'exemples, que la cohérence de l'énonciation théorique ne représente pas à elle seule une garantie suffisante d'efficacité.

Celle-ci ne s'impose qu'à travers l'expérience. La théorie doit être mise à l'épreuve dans l'interprétation même qu'on entend lui donner. « Qu'à cela ne tienne », dirait-on, « il suffira de monter un dispositif d'observation adéquat et de faire des mesures requises. Une fois celles-ci effectuées et interprétées, la situation ne comportera plus d'équivoque. D'une énonciation simplement cohérente (à supposer qu'elle l'ait été), le témoignage de l'expérience aura fait ou non une énonciation efficace et par conséquent admissible. N'est-ce pas toujours ainsi que, dans les sciences visant à la connaissance du réel, le discursif et l'expérimental ont à se compléter mutuellement pour former la double trame de la connaissance objective ? » [329]

3. Le problème de l'instrument

Eh bien, non ! Ce n'est pas ainsi que, du point de vue d'une juste méthode, les choses doivent être jugées. Il ne suffit pas d'avoir l'intention d'effectuer une série de mesures décisives pour être en état de le faire. Pour mesurer, il faut disposer des instruments de mesure indispensables. A-t-on le droit (le droit méthodologique) de passer complètement sous silence la question de la provenance des instruments ? En laissant cette question de côté, comme si elle ne soulevait pas de difficultés, on semble admettre que l'expérimentateur n'aura aucune peine à se procurer les instruments dont il aura besoin, que ceux-ci lui sont donnés au préalable. Or, en général, la situation de l'observateur est toute différente. Il peut arriver que, faisant le projet de mesurer une grandeur avec un certain degré de précision, il n'ait aucun instrument dont il puisse se servir à cet effet. Plus d'une fois, au cours de notre étude, nous nous sommes vus placés dans cette situation. C'était en particulier chaque fois que nous nous préparions à franchir un « seuil de précision ». Peu à peu, nous avons vu le problème de l'instrument prendre toute sa dimension en liaison avec le problème de la précision. Il vient prendre sa place dans le dialogue qui doit s'établir entre l'énonciation théorique et l'épreuve expérimentale. La vision de ce qu'est la situation normale de celui qui s'engage dans une recherche s'en trouve essentiellement influencée. Cette situation, la voici : ayant à vérifier la justesse d'une énonciation théorique visant une certaine réalité physique – son interprétation, qui n'est donnée elle-même que pratiquement, c'est-à-dire avec un certain degré de stabilité et de précision – le praticien de la recherche ne se trouve pas automatiquement en possession des instruments de mesure indispensables. L'obligation d'inventer et de produire ces instruments s'intègre alors au programme de la recherche. L'instrument de mesure a pour fonction de ménager la rencontre entre les théories énoncées et les réalités observées. Dans deux cas au moins la production d'un instrument inédit se présente comme une condition préalable au progrès de la recherche :

A) Il peut arriver que les instruments déjà existants ne comportent pas le degré de précision requis pour qu'une observation puisse être décisive.

B) Il peut arriver aussi (le passage de la physique classique à la physique relativiste en offre précisément un exemple privilégié) que les instruments de mesure dont on disposerait ont été imaginés et construits en accord avec des vues théoriques dont l'expérience a révélé l'insuffisance et auxquelles on se propose de substituer des vues théoriques nouvelles et plus exactes. (...) [330]

4. Un cercle vicieux ?

N'y a-t-il pas, dans ce prêté-rendu de la mécanique à la montre et de la montre à la mécanique, quelque chose d'analogue à un cercle vicieux ? Ce serait certes le cas s'il n'y avait là qu'une affaire de définition. Mais la mécanique et son édification théorique d'une part, la montre et sa [331] fabrication pratique, d'autre part, forment un tout qu'on engage comme tel dans l'épreuve, dans une activité dont les critères sont l'échec ou le succès. Pour les deux à la fois, leur succès commun c'est que le temps, dont la montre fournit la mesure, puisse être interprété comme une réalisation de la variable t de la mécanique. Il suffit pour cela que cette interprétation fasse de celle-ci une discipline efficace, c'est-à-dire une discipline durablement applicable.

Le succès de la mise à l'essai du tout assure donc deux résultats essentiels : le premier est relatif à la montre dont il assure la qualité de bonne montre, de montre ayant la capacité de bien mesurer le temps dont la mécanique entend se servir dans ses applications ; le second regarde la mécanique dont il assure le caractère de discipline efficace.

A celui qui s'inquiète de la signification de la variable t qui figure dans l'énonciation des lois de la mécanique, on peut donc bien répondre : c'est le temps que les bonnes montres mesurent. Mais il convient d'ajouter aussitôt que s'il en est ainsi, c'est que les montres ont été fabriquées conformément à cette destination en obéissant par avance, dans toute la mesure du possible, aux lois qu'elles serviront à rendre manifestes. Et il conviendra d'ajouter encore qu'en renonçant à l'idée d'un instrument construit et étalonné par avance dans un stade antérieur à celui de l'application décisive qui fonde sa légitimité en même temps que celle de la mécanique, on ne commet aucune erreur de méthode. En reconnaissant qu'en faisant collaborer la montre à la mise à l'épreuve de la mécanique, on fait une expérience qui la met elle aussi à l'épreuve. Ce n'est pas une lacune ou une défaillance de la méthode qu'on découvre ; on ne fait que mettre en place, en lui conférant son inaliénable importance, le rôle de l'épreuve d'efficacité – épreuve dans laquelle l'instrument de mesure est également engagé. C'est en se déployant jusque dans l'instrument en tant qu'organisatrice d'une activité capable de la remettre en question que la discipline se montre valable. La démonstration à laquelle elle procède n'est pas une démonstration de logique, mais une démonstration par le fait : c'est parce que l'activité qu'elle organise échappe de fait à la sanction de l'échec que la discipline est valablement fondée.

François Vernotte – Nice, 10 novembre 2023

Retranscription de l'entretien avec Noël Dimarcq

Noël Dimarcq est directeur de recherches au CNRS. Il a été «Project Scientist» de la mission spatiale ACES – Atomic Clock Ensemble in Space. Entre 2006 et 2014, il a dirigé le laboratoire SYRTE – Systèmes de Référence Temps-Espace (Observatoire de Paris, CNRS, UPMC, LNE), puis en 2011, le réseau FIRST-TF dans le domaine de la métrologie du temps et des fréquences, réseau labellisé Laboratoire d'Excellence dans le Programme Investissements d'Avenir. Aujourd'hui il est membre titulaire du Bureau des longitudes, Président de la CCTF Task Force on Updating the Roadmap for the redefinition of second (CCTF-TFU), et Vice-Président recherche et innovation, Université Côte d'Azur.

François Vernotte : Quels sont les changements significatifs intervenus depuis 1956 dans la métrologie du temps ? (aussi bien scientifique, technique, institutionnels, industriels...)

Noël Dimarcq : L'adoption du Temps des Éphémérides en 1956 par la CIPM avait pour but d'améliorer la stabilité de la réalisation de l'unité de temps. Il avait été remarqué dans les années 1930 que la rotation de la terre, qui était alors à la base de la définition de l'unité de temps, présentait des variations notables. Il a alors été décidé de se référer à la durée de l'année pour définir le temps parce que cette dernière était plus stable que la durée du jour. C'est l'année tropique¹ 1900 qui fut choisie comme référence, cette année étant déjà une année de référence pour les astronomes. Mal-

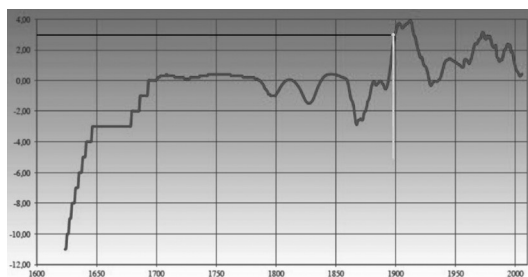


Illustration 1. Variation de la durée du jour solaire moyen (en ms) au cours des siècles précédents.

¹ L'année tropique, ou année équinoxiale ou encore année solaire, correspond à la périodicité des saisons terrestres : elle est définie comme l'intervalle de temps au bout duquel la position apparente du Soleil vue de la Terre, définie par la longitude moyenne du Soleil sur son orbite apparente, revient à la même valeur. FV, d'après wikipedia (entrée : année tropique).

heureusement, il se trouve que ce choix n'était pas idéal parce qu'on comprendra plus tard qu'elle présentait un biais statistique dans sa durée (voir illustration 1). Ce biais va avoir une conséquence importante : puisque la durée du jour solaire moyen en 1900 était plus longue que lors des autres années, la durée de l'année 1900 exprimée en jours solaires moyens apparaît plus courte et donc la seconde de Temps des Éphémérides, calculée comme une fraction de l'année 1900, également. Lors de l'adoption de la seconde atomique en 1967, il a fallu assurer une stricte continuité de cette durée par rapport à la définition précédente, c'est à dire à la seconde des éphémérides qui était trop courte parce que basée sur la durée d'une année qui n'était pas nominale, d'où les problèmes de dérive qui ont conduit à mettre en place le mécanisme des secondes intercalaires (voir note de bas de page n°6).

FV : Dirais-tu que la définition de 1956 a été un peu prématurée, surtout à une époque où les premières horloges atomiques existaient déjà et montraient leur très fort potentiel d'amélioration ?

ND : Il faut se rendre compte qu'à l'époque déjà, un véritable débat s'est engagé entre les astronomes et les physiciens, les premiers voulant faire reposer la définition sur la phase d'un phénomène astronomique, c'est à dire donner la primauté au Temps des Éphémérides, alors que les derniers voulaient faire reposer la définition sur la fréquence réalisée par les horloges atomiques et fixée par la physique quantique, ce qui constituait un véritable changement de paradigme !

FV : Effectivement, le passage du Temps des Éphémérides au Temps Atomique International (TAI) constitue une sorte de renversement puisque, auparavant, que ce soit avec le temps solaire moyen ou le Temps des Éphémérides, on définissait déjà l'échelle de temps dont on extrayait ensuite la définition de la seconde alors qu'avec le temps atomique, on définit d'abord la fréquence de la transition à la base du fonctionnement de l'horloge ou, ce qui revient au même, la durée (c'est-à-dire l'inverse de la fréquence) de la seconde pour constituer ensuite l'échelle de temps atomique en juxtaposant la succession des secondes atomiques !

ND : Oui et ceci a alimenté beaucoup de discussions de 1956 à 1967. Pour autant, je ne pense pas qu'on puisse parler de décision prise rapidement. D'ailleurs, on peut faire un parallèle intéressant avec un cas tout-à-fait similaire pour la définition du kg. Jusqu'en 2018, le kg était défini par la masse étalon conservée au BIPM. Mais depuis plusieurs années il avait été remarqué que la masse de tous les étalons secondaires dérivait de la même façon par rapport à la masse de l'étalon primaire, par définition égale à 1 kg, ce qui signifiait que c'était la masse de ce dernier qui changeait avec le temps, entraînant avec lui l'unité de masse ! Il fallait donc baser le kg non plus sur un étalon physique mais sur une constante fondamentale. Deux possibilités co-existaient : définir le kg à partir de la constante de Planck h et le réaliser à l'aide d'une balance de Kibble ou le définir à partir du nombre d'Avogadro N_A et le réaliser à partir d'une sphère de Silicium de 93,6 mm de diamètre. C'est finalement la première de ces deux définitions qui a été retenue par la 26^{ème}

CGPM en 2018. Malheureusement, les différences entre les réalisations du kg effectuées par ces deux méthodes ont conduit à une adaptation de 7 μg , ce qui n'est pas du tout négligeable ! Une campagne de mesure internationale doit avoir lieu l'année prochaine pour tenter de résoudre ce problème et elle risque de conduire à une nouvelle adaptation. Cela dit, qu'il s'agisse de la définition de la seconde de 1956 ou du kg de 2018, ces problèmes ne peuvent pas être mis sur le compte de la précipitation mais plutôt sur de trop grandes pressions... La règle qui prévaut est toujours : prudence et vérifications multiples et croisées, pas d'urgence ! D'ailleurs cela vaut également pour la situation actuelle de la définition de la seconde atomique d'autant plus qu'il n'existe pas d'application limitée aujourd'hui par la définition actuelle : on réalise couramment des mesures avec une exactitude de 10^{-18} sans s'appuyer directement sur la définition de la seconde dont la réalisation est quant à elle limitée à un niveau d'incertitude de 10^{-16} par l'exactitude des fontaines à atomes de césium refroidis par laser !

FV : Que va changer la nouvelle définition de la seconde pour l'échelle de temps de référence et les laboratoires qui y contribuent ?

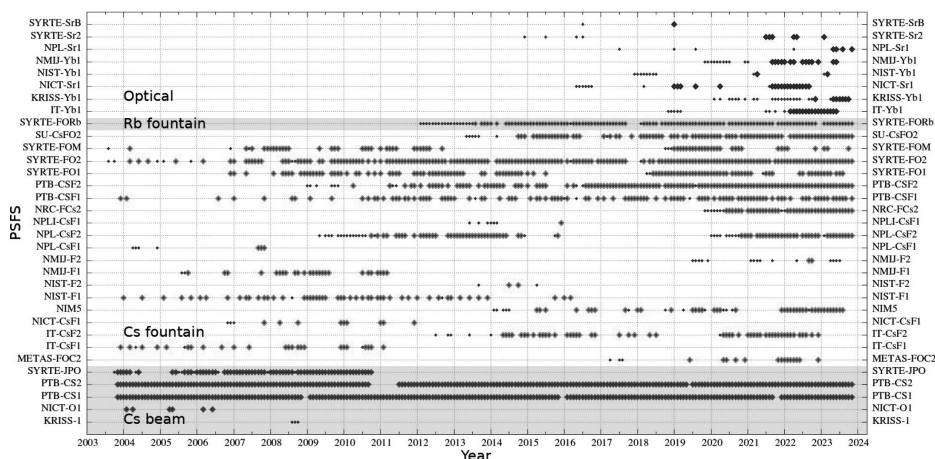


Illustration 2: Étalons primaires et secondaires de fréquence participant au pilotage de l'Échelle Atomique Libre pour réaliser le Temps Atomique International (Crédits : BIPM)

ND : Il n'y aura pas de changement fondamental dans la construction de l'échelle de temps, même si la nouvelle définition doit en principe en améliorer la qualité. Elle sera calculée de la même façon qu'est calculé TAI actuellement, c'est-à-dire à partir d'une Échelle Atomique Libre (EAL) qui est la moyenne pondérée des temps donnés par environ 400 horloges atomiques commerciales participantes (étalons de temps), pilotée par quelques étalons primaires et secondaires de laboratoire (étalons de fréquence), qui assurent la stabilité long terme de l'échelle de temps et l'exac-

tude de l'intervalle de temps du TAI par rapport à la définition SI de la seconde. La répartition des différents étalons primaires et secondaires permettant de piloter EAL sur la référence de fréquence pour obtenir TAI évolue constamment (voir illustration 2). D'ailleurs, lors du changement de définition de la seconde, l'ensemble des horloges participant à l'EAL sera encore pour longtemps majoritairement constitués d'horloges atomiques Radio-Fréquence (Césium, maser à hydrogène) et un bi-seau s'effectuera entre ces anciennes horloges RF et les nouvelles horloges optiques, même si seules ces dernières deviendront les étalons primaires².

FV : Lors de ta conférence intitulée « Vers une redefinition de l'unité SI de temps »³, tu as présenté les 3 options qui sont envisagées par le CCTF pour servir de base à la future définition de la seconde :

1. une définition basée sur la fréquence de transition d'une espèce atomique (atome ou ion) utilisée dans les horloges optiques (Al⁺, Ca, Hg⁺, Yb, Yb⁺, Sr, etc.)

2. une définition basée sur la moyenne géométrique des fréquences d'un ensemble de transitions de différentes espèces, le poids de chaque transition étant d'autant plus fort que l'incertitude de l'étalon de fréquence correspondant est faible. Deux variantes de cette option sont envisageables :

- 2.1. l'ensemble de transitions et leurs poids sont fixés au moment de la définition et ne changent plus ensuite ;

- 2.2. l'ensemble de transitions et leurs poids sont définis au moment de la définition mais ils peuvent évoluer ensuite en fonction de l'émergence de nouvelles horloges optiques et de l'évolution des incertitudes des horloges fonctionnant avec les transitions faisant partie de l'ensemble

3. une définition qui repose sur une constante fondamentale dont la valeur serait fixée.

As-tu personnellement une préférence parmi ces options ?

ND : Il me semble clair que celles qui ont le plus de chance d'aboutir sont les options 1 et 2.1. Un travail extrêmement minutieux d'évaluation des pour et des contre de chaque option est en train d'être mené et ce sont ces 2 options qui sont pour l'instant les mieux placées.

Par exemple, l'option 1 a comme avantage d'être simple puisqu'elle est vraiment semblable à la définition actuelle et ne nécessite que de passer d'une transition RF du Cs à une transition optique d'une autre espèce atomique. En revanche, elle comporte un risque : celui de ne pas choisir la bonne espèce car il n'y en a pas une qui se dégage actuellement au regard de l'exactitude obtenue et son potentiel d'amélioration. En effet une espèce qui semblerait plus judicieuse à exploiter aujourd'hui pourrait s'avérer moins intéressante plus tard à la faveur d'innovations technologiques. Cette option présente en outre une faiblesse : une fois l'espèce

² De la même façon, un certain nombre d'horloges optiques contribue actuellement à TAI en tant qu'étalons de fréquence secondaires. ND

³ Workshop temps-fréquence et technologies quantiques, hôtel Saint-Paul, Nice, 10 novembre 2023. FV

atomique choisie, l'intérêt pour d'autres atomes retombera, compte-tenu des ressources limitées des laboratoires de métrologie, et nous pourrions passer à côté d'améliorations majeures de la définition de la seconde.

En revanche, les avantages et les inconvénients de l'option 2 sont exactement à l'inverse de l'option 1 : elle est plus complexe à comprendre puisqu'elle prend en compte conjointement plusieurs espèces atomiques, même si chaque transition de l'ensemble choisi sera une réalisation primaire autonome de la définition, mais elle aura l'avantage de ne pas miser sur une seule espèce et de favoriser le maintien des recherches sur toutes les espèces concernées.

Cependant, l'idée d'avoir un ensemble de transition et des coefficients de pondération qui pourraient évoluer et être modifiés de temps à autre (à l'occasion des réunions de la CGPM, avec une périodicité à définir) est trop difficile à accepter aujourd'hui. La communauté scientifique, et en particulier métrologique, n'est pas prête à un tel saut conceptuel. Si l'option 2.1 constitue bel et bien une alternative plausible, l'option 2.2 est plus révolutionnaire et son acceptabilité n'est pas acquise. Quant à l'option 3, si elle assurerait une parfaite cohérence au Système International (SI) d'unité puisque le temps serait fixé par une constante fondamentale à l'instar des autres unités, elle se heurte à l'heure actuelle au trop larges domaines d'incertitude avec lesquelles sont connus les différentes constantes. Elle est donc clairement prématurée.

FV : On voit bien que les décisions, in fine, seront prises pour des raisons scientifiques mais aussi politiques voire peut-être même sociétales. Peux-tu nous indiquer comment sont constituées les différentes instances (CGPM, CIPM, CCTF) et, en particulier, comment se partagent les rôles scientifiques et politiques au sein de ces instances ?

ND : La Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) est l'instance décisionnelle. Son rôle est principalement politique. Elle est constituée de délégations représentant chacun des 64 états membres de la Convention du Mètre et des 36 états associés. Les délégations des états-membres étant aussi responsables de la contribution de leur pays au budget du BIPM, les questions budgétaires entrent également dans les attributions de la CGPM. Elle se réunit tous les 4 ans. Elle prend ses décisions sur la base du consensus mais pas forcément à l'unanimité (sauf pour le budget du BIPM).

Le Comité International des Poids et Mesures (CIPM) est une instance à la fois politique et scientifique. Elle est constituée de seulement 18 membres et s'appuie sur les Comités Consultatifs (CC), en particulier le Comité Consultatif du Temps et des Fréquences (CCTF) pour ce qui concerne la définition de la seconde et de l'échelle de temps de référence.

Le CCTF est évidemment beaucoup plus centré sur les aspects scientifiques bien que des considérations politiques y soient également présentes. Par exemple, une décision scientifique qui exclurait de fait certaines parties du monde et/ou qui en favoriseraient d'autres, par exemple le choix d'une technologie qui n'est maîtrisée que par un seul état, ne pourrait être acceptée.

FV : Y a-t-il une tension possible voire réelle entre les dimensions internationales et universelles du temps ?

ND : Non, il n'y a pas de tension de cet ordre. L'universalité est dans l'ADN de la convention du mètre et des instances qui s'y rattachent ce qui se traduit notamment par une volonté jamais démentie de chercher, a minima, à prendre des décisions par consensus dans l'intérêt de tous les états. L'aspect international est donc une des dimensions que revêt cette vision universaliste.

FV : Y a-t-il un juste équilibre entre les progrès scientifiques et techniques d'une part, et les enjeux économiques et sociétaux d'autre part ?

ND : Pas sur la définition de la seconde ni, généralement, sur les autres unités du SI. Les besoins industriels sont souvent très loin des précisions qui correspondent aux réalisations primaires des définitions des unités du SI. En revanche, les impératifs de traçabilité aux étalons nationaux et internationaux impliquent une traçabilité métrologique aux définitions. Dans le domaine du temps fréquence, il y a généralement un fossé, voire un gouffre, entre les incertitudes de mesure industrielles et les capacités des étalons primaires dans les laboratoires métrologiques. Toutefois, il existe des exceptions, comme par exemple l'interopérabilité entre les différents systèmes des Global Navigation Satellite Systems (GNSS) qui requiert que l'échelle de temps de chaque système (GPS, Glonass, Galileo, Beidou, etc.) soit étalonnée sur des fontaines à atomes froids assurant par ailleurs la réalisation primaire de la seconde.

FV : Comment analyses-tu la responsabilité sociétale des chercheurs et institutions de recherche ? Y a-t-il des conflits d'intérêts ? Qu'en est-il de ta propre responsabilité ?

ND : En ce qui me concerne, je n'ai ni conflit d'intérêts, ni responsabilité sociétale directe, si ce n'est le devoir de savoir expliquer la nouvelle définition à tout le monde y compris aux scolaires et au grand public. Les aspects de communication et d'éducation sont donc importants pour tous les CCs, en particulier pour le CCTF quand la définition de la seconde sera changée. Mais il y a effectivement une responsabilité sociétale des structures impliquées dans la métrologie qui dépend de leur niveau d'implication dans la société. C'est évidemment différent si on se place au niveau du BIPM, des National Metrology Institutes⁴ (NMI) ou des Designated Institutes⁵ (DI). Pour le temps fréquence, il s'agit de mettre à disposition

⁴ Le National Metrology Institute (NMI) d'un état est l'organisme ayant la responsabilité de maintenir les étalons de mesure nationaux et de les raccorder au Système International d'unités. En France, par exemple, le NMI est le Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE). FV

⁵ Un « Designated Institute » est un laboratoire chargé par le NMI d'un état de mettre en œuvre la métrologie nationale dans un domaine considéré. En France, le LNE-SYRTE, à l'observatoire de Paris, est le DI pour la métrologie du Temps et des Fréquences. FV

des signaux de référence à destination d'un public plus ou moins large avec une qualité et continuité de service plus ou moins grande et des niveaux d'incertitude également variables. Il s'agit toujours de compromis dans le service entre un bon niveau de précision et une durée de service assuré plus ou moins long : on peut ainsi choisir entre une stabilité de 10^{-17} sur un temps long ou de 10^{-18} sur un temps plus bref. C'est donc de la responsabilité sociétale des laboratoires de développer des étalons à l'état de l'art fournissant des services à l'extérieur du monde scientifique. Pour le DI en Temps-Fréquence, cela implique d'assurer la réalisation et la diffusion en continu du temps légal français sans aucune interruption de service.

À titre d'exemple, on peut considérer la responsabilité du BIPM qui doit diffuser chaque mois la circulaire T qui fournit les différences entre UTC⁶ et les UTC(k)⁷ de chaque NMI (ou DI) contributeur par pas de 5 jours. Mais le BIPM fournit également à ces mêmes laboratoires UTCr (UTC rapide) qui, chaque semaine, établit la différence UTCr et les UTC(k) de chaque NMI avec un pas journalier. Ainsi, la référence est UTC mais UTCr donne un point intermédiaire moins précis (UTCr n'est pas UTC) mais plus fréquent.

Pour assurer un tel service social, il faut impérativement concilier l'état de l'art de la physique et la fiabilité ultime de la métrologie. De la même façon qu'il faut trouver une voie qui va de l'expérience de laboratoire au développement industriel, il faut ici trouver la balance entre les résultats parfois très ponctuels de la recherche et le caractère opérationnel sur le long terme que doit entretenir la métrologie. Et il s'agit bien d'une dialectique : si le côté opérationnel est privilégié, le risque est grand d'être dépassé scientifiquement ; si le côté scientifique est privilégié, le besoin de continuité de service risque d'être rompu. À titre d'exemple, le développement des fontaines atomiques au LPTF⁸ doit énormément au duo formé par Christophe Salomon, physicien/métrologue, et André Clairon, métrologue/physicien.

Il s'agit donc de ne pas rater le virage que nous sommes en train de prendre sur les horloges atomiques : il faut que les individus qui font la science à l'état de l'art et ceux qui produisent les services de métrologie se respectent et travaillent en bonne intelligence.

⁶ Le Temps Universel Coordonné (UTC) est le TAI établi par le BIPM décalé d'un nombre entier de secondes intercalaires pour ne pas s'écarter du temps donné par la rotation de la Terre (UT1) de plus de 0,9 s. La dernière seconde intercalaire a été ajoutée entre le 31 décembre 2016 à 23h59m59s UTC et le 1^{er} janvier 2017 à 00:00:00. Aujourd'hui (2023), UTC=TAI+37s. UTC est à la base du temps légal de chaque état-membre. On pourra se référer à l'article « Temps Universel ou Temps International ? » de Gianna Panfilò, dans le présent numéro des Bachelard Studies, pour de plus amples renseignements sur TAI et UTC. FV

⁷ Alors qu'UTC est un temps « papier », dans la mesure où il est calculé par le BIPM en après coup à partir d'intercomparaisons d'horloges atomiques, chaque UTC(k) est la réalisation physique d'UTC fournie par l'horloge de référence du DI « k ». Ainsi, pour la France, UTC(OP) est la réalisation physique d'UTC fournie par l'horloge atomique de référence de l'Observatoire de Paris. UTC(OP) est le temps légal en vigueur en France. FV

⁸ Le Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences de l'Observatoire de Paris s'est transformé au début des années 2000 en LNE-SYRTE. FV

FV : Quels sont les enjeux sociétaux ou environnementaux du changement de la définition de la seconde ?

ND : Les enjeux sociétaux concernent plus l'abandon, ou plutôt la suspension⁹, des secondes intercalaires (voir note 6) que le changement de définition de la seconde elle-même. La garantie de continuité qu'offre une échelle de temps sans seconde intercalaire présente l'avantage de supprimer les risques de plantage des systèmes informatiques liés à ces événements disruptifs. De même dans le cas des transports, des télécommunications ou de l'énergie, des problèmes importants peuvent survenir parce que des procédures différentes sont activées par les opérateurs le jour où doit être ajoutée cette seconde intercalaire : certains, à l'instar d'UTC, ajoutent une 61^{ème} seconde à la dernière minute de la journée considérée alors que d'autres lissent cette seconde sur toute la journée, ce qui est ingérable pour tous ces systèmes qui réclament des synchronisations bien plus fine que la seconde. Cependant, comme il a été dit plus haut, les secondes intercalaires n'ont pas été abandonnées, les débats politiques autour de cette question n'ayant abouti à aucun consensus. En revanche, il a été (difficilement) accepté d'autoriser des écarts entre UT1, le temps lié à la rotation de la terre sur elle-même, et TAI supérieurs à 1 seconde. On pourrait par exemple imaginer d'ajouter une minute intercalaire chaque fois que cet écart atteint une minute, ce qui devrait se produire environ une fois par siècle, ou, encore mieux attendre un écart d'une heure, ce qui arriverait tous les 4000 ans et nous laisserait le temps de prévoir l'événement !

En comparaison de cette suspension des secondes intercalaires, les enjeux sociétaux liés à la nouvelle définition de la seconde sont bien moins importants. Pourtant, compte-tenu de l'ubiquité de la synchronisation dans beaucoup de domaine d'activité notamment dans tous les réseaux (télécommunications, transports, transactions bancaires, énergie, etc.), on pourrait imaginer que la redéfinition de la seconde aurait d'importantes conséquences. Par exemple, la synchronisation est au cœur des « smart grids » et de la distribution de l'énergie. Une erreur infime de phase (donc de temps) lors de la commutation entre des réseaux électriques pourrait en effet avoir des conséquences très dangereuses. Pourtant, comme la nouvelle définition de la seconde sera établie dans une stricte continuité par rapport à l'ancienne définition, il ne devrait en résulter aucun impact dans ce domaine comme dans les autres.

François Vernotte

FEMTO-ST – Université de Franche-Comté
francois.vernotte@femto-st.fr

Noël Dimarcq

SYRTE – CNRS
Noel.Dimarcq@obspm.fr

⁹ Effectivement, on ne supprime pas en soi les secondes intercalaires ; on autorise juste que la différence entre UTC et UT1 puisse devenir supérieure à 1 seconde afin d'assurer la continuité à UTC sur une durée d'au moins un siècle. ND

Raphaël Dallaporta

Équation du Temps (2019-2021)



Vue d'exposition (détail), galerie Jean-Kenta Gauthier, Paris, 2020.

Raphaël Dallaporta réalise à l'Observatoire de Paris une vérification de ce phénomène astronomique connu depuis l'antiquité : en photographiant chaque jour à la même heure la tache du soleil projetée le long de la méridienne tracée en 1732 au sol de la Salle Cassini, l'artiste vérifie que la courbe figurée par ces points de

lumière forme bien au cours d'une année une boucle « en 8 » autour de l'axe. Cette courbe résulte de l'équation du temps, traduisant visuellement les variations d'écart entre le temps moyen et le temps solaire vrai. À travers cette expérience répétée quotidiennement à l'Observatoire de Paris, Raphaël Dallaporta nous rappelle que l'étalon journalier de 24 heures ne constitue qu'un temps rectiligne et uniforme, une convention nécessaire au fonctionnement de nos activités. Autrement dit, comme le rappelle Héraclite dans son fragment convoqué par l'artiste : « Le Soleil est nouveau chaque jour ». Cette expérience au long cours, Raphaël Dallaporta la relate dans son livre *Équation du Temps* (The Eyes Publishing, Paris, 2020) postfacé par l'astronome et historien des sciences Denis Savoie.



Restitution de l'enregistrement quotidien de l'image du Soleil dans la Salle Cassini de l'Observatoire de Paris au midi moyen local, durant l'année 2019.

Astrarium, MiH, La Chaux-de-Fonds, 2020



Vue d'exposition au Musée du Temps, Besançon (détail): Mercure, Raphaël Dallaporta, *Astrarium*, 2020.

Pour célébrer le patrimoine immatériel horloger, l'attention de Raphaël Dallaporta s'est tournée sur le manuscrit de Padoue, qui contient la première représentation détaillée d'une horloge connue à ce jour.

Achevée en 1380, l'horloge originale de Dondi a été considérée à l'époque comme une nouvelle merveille du monde, admirée par les puissants de son temps,

à l'instar de Charles Quint. Disparue au XVI^e siècle, elle a fait l'objet de plusieurs répliques, dont celle conservée au musée international d'horlogerie de La Chaux-de-Fonds (MIH). au milieu des années 1980, d'après le manuscrit original préservé à Padoue depuis plus de six siècles.

L'auteur de l'Astrarium, Giovanni Dondi (1330-1388), élaborait durant quinze années cette extraordinaire horloge qui matérialisait mécaniquement le système géocentrique de Ptolémée (II^e siècle), permettant de calculer les positions de 7 astres à tout moment de l'année.

Les sept photographies réalisées par Raphaël Dallaporta sont des enregistrements de la mise en mouvement de chaque astre sur le cadran correspondant : le Soleil, Mercure, Vénus, la Lune, Mars, Jupiter et Saturne. En collaborant avec Masaki Kanazawa, restaurateur du MIH qui actionnait manuellement les astres, l'artiste a réalisé une mise en lumière des cadrans, grâce à des temps de pose relativement longs. La lumière dessine ainsi des boucles à l'apparence particulière les planètes semblent reculer pour mieux avancer, un phénomène dit de rétrogradation qui a obsédé des générations d'astronomes, et que Raphaël Dallaporta traduit en métaphore de l'avancée non linéaire du progrès.

Raphaël Dallaporta

Mouvement du monde

Raphaël Dallaporta est un photographe français, lauréat du prix Niépce en 2019.

Par sa pratique artistique, il crée des connexions insolites entre l'histoire, les sciences, les arts. Avec la complicité de chercheurs, il élabore des dispositifs visant à rendre sensibles des objets, phénomènes ou territoires, respectivement cachés, oubliés ou inaccessibles. Avec une certaine lucidité dans le choix de ses sujets d'étude, son œuvre cherche toujours à interroger la relation que le progrès entretient avec notre évolution. Il est exposé en 2004 et en 2006 aux Rencontres d'Arles et devient lauréat ICP Infinity Award à New-York en 2010. En 2014, il est pensionnaire de l'Académie de France à Rome – Villa Médicis. Le photographe obtient en 2015 l'autorisation du ministère de la Culture d'accéder dans la Grotte Chauvet et d'y réaliser sous la forme de panorama une restitution remarquable publié aux éditions Xavier Barral. Ses œuvres sont notamment présentes dans les collections du Centre National d'Art Plastique, de la Maison Européenne de la Photographie, du Centre Pompidou, du Musée de l'Élysée à Lausanne et de la New York Public Library.

Avec *Équation du Temps*, Raphaël Dallaporta réalise à l'Observatoire de Paris une vérification d'un phénomène astronomique connu depuis l'antiquité : en photographiant chaque jour à la même heure la tâche du soleil projetée le long de la méridienne tracée en 1732 au sol de la Salle Cassini, l'artiste vérifie que la courbe figurée par ces points de lumière forme bien au cours d'une année une boucle « en 8 » autour de l'axe. Cette courbe résulte de l'équation du temps. À travers cette expérience répétée quotidiennement à l'Observatoire de Paris, Raphaël Dallaporta nous rappelle que l'étalon journalier de 24 heures ne constitue qu'un temps rectiligne et uniforme, une convention nécessaire au fonctionnement de nos activités. Autrement dit, comme le rappelle Héraclite dans son fragment convoqué par l'artiste : « Le Soleil est nouveau chaque jour ». Cette expérience au long cours, Raphaël Dallaporta la relate dans son livre *Équation du Temps* (The Eyes Publishing, Paris, 2020) postfacé par l'astronome et historien des sciences Denis Savoie.

Équation du Temps sera exposé la même année aux Musées du Temps de Besançon ainsi que Les œuvres de la série *Astrarium* explorant la métaphore du caractère non linéaire de l'avancée du progrès. Chaque photographie résulte de la mise en mouvement d'un cadran de l'Astrarium, la plus ancienne horloge astronomique

connue dans l'histoire, réalisée au Moyen Âge par Giovanni Dondi et qui disparut à la Renaissance. Cet instrument relevait l'exploit, en matérialisant le système géocentrique, de calculer les positions à tout moment de l'année des sept astres alors observables, Soleil, Mercure, Vénus, Lune, Mars, Jupiter, Saturne. Le Musée International d'Horlogerie (MIH, La Chaux-de-Fonds, Suisse) au milieu des années 1980, parvenait à reproduire l'horloge grâce au manuscrit original de Dondi préservé depuis six siècles à Padoue. En créant des images en mouvement de cette horloge considérée en son temps comme une merveille du monde, Raphaël Dallaporta en réalise une nouvelle représentation, en 2020, année de l'inscription par L'UNESCO des savoirs-faire horloger au patrimoine culturel immatériel de l'humanité. Collaborant avec Masaki Kanazawa, restaurateur du MIH, l'artiste a manifesté en photographie le mouvement de chaque cadran de l'Astrarium à l'aide d'une source lumineuse et des longs temps de pose. La lumière forme ainsi des boucles qui reviennent sur leur course tout en se déployant; les planètes semblent reculer pour mieux avancer, un phénomène dit de rétrogradation qui constitue pour l'artiste une métaphore de la course non linéaire du progrès.

Raphaël Dallaporta, artiste photographe
né en 1980 vivant et travaillant à Paris
est représenté par la galerie Jean-Kenta Gauthier.

Gilles Cohen-Tannoudji

Phénoménoteknik du temps et cosmogonie scientifique

The coming together of the two great scientific disciplines of the 20th century, particle physics and cosmology, each of which has developed a robust standard model, has led to the birth of an authentic scientific theory of the beginnings of the universe. Such a theory, based on quantum (micro)physics, can serve as a framework for the theoretical thinking of time in contemporary science. On these premisses, the contribution will argue that the phenomenotechnics of time, based on a reading of Bachelard's *Noumène et microphysique*, Georges Lemaître's book *L'hypothèse de l'atome primitif – Essai de cosmogonie* and its preface by Ferdinand Gonseth, can provide the methodological framework to meet the challenge of a scientific cosmogony, whose standard model would result from the consolidation of these two standard models.

Keywords: *cosmological constant, cosmogony, phenomenology, noumenon.*

Le rapprochement des deux grandes disciplines scientifiques du XXème siècle, la physique des particules et la cosmologie, qui se sont, chacune, dotées d'un *robuste modèle standard*, débouche sur la naissance d'une authentique théorie scientifique des débuts de l'univers, relevant de la (micro)physique quantique, et pouvant servir de cadre à la pensée théorique du temps dans la science contemporaine. Nous essaierons de montrer en quoi la *phénoménoteknik* du temps, telle que nous la comprenons, à partir de la lecture de *Noumène et microphysique* de Bachelard, du livre de Georges Lemaître *L'hypothèse de l'atome primitif – Essai de cosmogonie* – et de sa préface par Ferdinand Gonseth, pourrait fournir le cadre méthodologique pouvant permettre de relever le défi d'une *cosmogonie scientifique* dont le modèle standard résulterait de la consolidation de ces deux modèles standards.

Mots-clés: *constante cosmologique, cosmogonie, phénoménologie, noumène.*

L'incontro tra le due grandi discipline scientifiche del XX secolo, la fisica delle particelle e la cosmologia, ciascuna delle quali ha sviluppato un *robusto modello standard*, ha portato alla nascita di un'autentica teoria scientifica degli inizi dell'universo, basata sulla fisica (micro) quantistica. Essa può fornire un quadro di riferimento per la riflessione teorica sul tempo nella scienza contemporanea. Su queste premesse, il contributo si propone di mostrare come la fenomenotecnica del tempo, per come essa emerge dalla lettura di *Noumène et microphysique* di Bachelard, del volume di Georges Lemaître *L'hypothèse de l'atome primitif. Essai de cosmogonie* e della sua prefazione per mano di Ferdinand Gonseth, possa fornire un quadro metodologico utile ad affrontare la sfida di una cosmogonia scientifica, il cui modello standard risulterebbe dal consolidamento di questi due modelli.

Parole-chiave: *costante cosmologica, cosmogonia, fenomenologia, noumeno.*

Olga Pombo

Science et école chez Bachelard. Discontinuité et nouveauté

Starting from the thesis that there is a dialogical conception of thought that runs through all of Bachelard's work, it will be a question of experimenting to take seriously the centrality of the concept of the school in its epistemology. In this sense, we will try to show: 1) how, in the sciences, the dynamism of a dialogical, polemical reason open to novelty is opposed to a foundationalist strategy of the Cartesian type; 2) how scientific reason is, for Bachelard, absolutely produced by the school; 3) how the school, and the "cogito of mutual obliga-

tion” that it activates, are also the structuring determination of the “scientific city”, 4) how the school and the scientific city both have a transcendental function as conditions of possibility of scientific knowledge; 5) how the school, as memory of the past and guarantor of scientific novelty, is the only universal institution capable of overcoming the irreversibility of human time.

It will then be a question of showing that the school presupposes a discontinuous metaphysics of time and, in addition, that the Bachelardian theory of the atom of time as a “pure event”, makes it possible to understand why, and how, novelty is possible, not only in science, but also in life. This means that I would say very little about cosmic, astronomical, physical time. But I would like to say a few words about human time.

Keywords: *school, scientific reason, novelty, discontinuous time.*

En partant de la thèse selon laquelle il y a une conception dialogique de la pensée qui traverse toute l'œuvre de Bachelard, il s'agira de prendre au sérieux la centralité du concept de l'école dans son épistémologie. Dans ce sens, on essayera de montrer : 1) comment, dans les sciences, le dynamisme d'une raison dialogique, polémique et ouverte à la nouveauté s'oppose à une stratégie fondationaliste de type cartésien ; 2) comment la raison scientifique est, pour Bachelard, absolument produite par l'école; 3) comment l'école, et le « cogito d'obligation mutuelle » qu'elle déclenche, sont aussi la détermination structurante de la « cité scientifique », 4) comment l'école et la cité scientifique ont, tous les deux, une fonction transcendantale en tant que conditions de possibilité de la connaissance scientifique; 5) comment l'école, en tant que mémoire du passé et garante de la nouveauté scientifique, est la seule institution universelle capable de vaincre l'irréversibilité du temps humain.

Il s'agira alors de montrer que l'école suppose une métaphysique du temps discontinu et, en plus, que la théorie Bachelardienne de l'atome de temps comme “événement pur”, permet de comprendre pourquoi, et comment, la nouveauté est possible pas seulement dans la science, mais aussi dans la vie. Cela veut dire que je traiterai très peu du temps cosmique, astronomique, physique, mais j'aimerais dire quelques mots sur le temps humain.

Mots clés : *école, raison scientifique, nouveauté, temps discontinu.*

Partendo dalla tesi che esiste una concezione dialogica del pensiero che attraversa tutta l'opera di Bachelard, si tratterà di sperimentare per prendere sul serio la centralità del concetto di scuola nella sua epistemologia. In questo senso, cercheremo di mostrare: 1) come, nelle scienze, il dinamismo di una ragione dialogica, polemica e aperta alla novità si contrapponga ad una strategia fondazionalista di tipo cartesiano; 2) come la ragione scientifica sia, per Bachelard, assolutamente prodotta dalla scuola; 3) come la scuola, e il “cogito dell'obbligo reciproco” che lei attiva, siano anche la determinazione strutturante della “città scientifica”, 4) come la scuola e la città scientifica hanno entrambi una funzione trascendentale come condizioni di possibilità di conoscenza scientifica; 5) come la scuola, mentre memoria del passato e garante della novità scientifica, sia l'unica istituzione universali capace di superare l'irreversibilità del tempo umano.

Si tratterà poi di mostrare che la scuola presuppone una metafisica discontinua del tempo e, specificamente, che la teoria bachelardiana dell'atomo del tempo come “evento puro”, consente di comprendere perché, e come, la novità sia possibile, non-solo nella scienza, ma anche nella vita. Ciò significa che direi molto poco sul tempo cosmico, astronomico, fisico. Ma vorrei dire qualche parola sul tempo umano.

Parole chiave: *scuola, ragione scientifica, novità, tempo discontinuo.*

Marie Pierre Lassus*Musique quantique et temps ondulant. Pour une théorie ondulatoire de l'alouette*

As an invisible art, music has a special relationship with time: ephemeral, it actualizes the present and stimulates life that soars, rises and falls like the bird whose songs manifests its “dazzling invisibility”. If it is true that time proceeds by leaps and bounds, leaping over useless durations as Bachelard thought when he placed music under the sign of the lark, it embodies a new reality in the twentieth century, plural and spatio-temporal, revealed by technical devices in this century, which saw the birth of electronic music. By proposing a wave theory of the lark that only the vibrating part of our being can understand, the philosopher suggests the idea of a music that would be both a quanta phenomenon and a special case of phenomenotechnics.

Keywords : *sound, space-time, phenomenon, lark, electroacoustics*

Art invisible, la musique entretient une relation particulière avec le temps : éphémère, elle actualise le présent et stimule la vie qui s'élance, monte et descend comme l'oiseau dont les chants manifestent l'« éclatante invisibilité ». S'il est vrai que le temps *procède par bonds, en sautant par-dessus les durées inutiles*, comme le pensait Bachelard qui plaçait la musique sous le signe de l'alouette, celle-ci incarne une nouvelle réalité au XXe, plurielle et spatio-temporelle, révélée par les appareils techniques en ce siècle qui a vu naître la musique électronique. En proposant une théorie ondulatoire de l'alouette *que seule la partie vibrante de notre être peut comprendre*, le philosophe suggère l'idée d'une musique qui serait à la fois un phénomène quantique et un cas particulier de *phénoménotechnique*.

Mots-clés : *son, espace-temps, phénomène, alouette, électroacoustique*.

In quanto forma d'arte invisibile, la musica ha un rapporto speciale con il tempo: effimera, attualizza il presente e stimola la vita, che si libra, si alza e si abbassa come l'uccello il cui canto rivela la sua “abbagliante invisibilità”. Se è vero che il tempo *procede a balzi, superando durate inutili*, come pensava Bachelard, ponendo la musica sotto il segno dell'allodola, essa incarna una nuova realtà del Novecento, plurale e spazio-temporale, rivelata dai dispositivi tecnici di questo secolo che ha visto la nascita della musica elettronica. Proponendo una teoria ondulatoria dell'allodola *che solo la parte vibrante del nostro essere può comprendere*, il filosofo suggerisce l'idea di una musica che sarebbe allo stesso tempo un fenomeno quantistico e un caso speciale di *fenomenotecnologia*.

Parole chiave: *suono, spazio-tempo, fenomeno, allodola, elettroacustica*.

Pierre Martin-Dussaud*Five surprises about the physics of time*

Over the past centuries, significant advancements have been made in our understanding of time, including its measurement and nature. These advancements have been propelled by conceptual breakthroughs facilitated by technical progress. For the formation of their scientific mind, physicists must transcend their initial preconceptions about time and are led to retrace the historical milestones to rediscover the concept of time at various levels of intricacy. Drawing inspiration from my own journey as a student and researcher, this article will explore five pivotal moments that were intellectual surprises and shaped my subsequent pursuit of comprehending time.

Keywords: *Physics, measurement, intellectual surprises, time, quantum time*.

Dans les derniers siècles, des progrès significatifs ont été réalisés dans la compréhension du temps, de sa mesure et de sa nature. Ces progrès ont été accélérés par des découvertes conceptuelles, elles-mêmes facilitées par le progrès technique. Au cours de sa formation scientifique, le physicien doit apprendre à dépasser ses préjugements sur le temps. Il est donc amené à retracer les différentes étapes historiques qui ont constitué le concept de temps selon différents niveaux de complexité. Inspiré par mon propre parcours d'étudiant et de chercheur, j'essaie dans cet article d'explorer cinq moments qui ont été des surprises intellectuelles et qui ont façonné ma recherche d'une meilleure compréhension du temps.

Keywords: *Physique, mesure, surprises intellectuelles, temps, temps quantique.*

Nel corso degli ultimi secoli sono stati compiuti significativi progressi nella comprensione del tempo, della sua misurazione e della sua natura. Tali progressi sono stati accelerati da scoperte concettuali a loro volta facilitate dal progresso tecnico. Durante la loro formazione scientifica, i fisici devono imparare a superare i loro preconetti iniziali sul tempo e sono perciò condotti a ripercorrere le diverse tappe storiche che hanno costituito il concetto di tempo secondo vari livelli di complessità. Ispirandomi al mio percorso di studente e di ricercatore, questo articolo esplora cinque momenti che hanno rappresentato delle sorprese intellettuali e hanno plasmato la mia successiva ricerca della comprensione del tempo.

Keywords: Fisica, misurazione, sorprese intellettuali, tempo, tempo quantistico.

Marc Lachièze Rey

Effets temporels dans les théories relativistes

This article focuses on relativistic time effects (RTEs), which are phenomena measurable by clocks, surpassing the predictions of Newtonian physics while being consistent with relativity. REEs, which include shifts and delays, are classified according to their kinematic or gravitational origin, with significant implications for astrophysics, cosmology and practical applications such as GPS. The text explores the fundamental conceptual differences between Newtonian perception and relative space-time realities, highlighting the nature of proper duration, measurable only within the framework of a particular history. Emblematic experiments, such as the Hafele-Keating and Pound-Rebka experiments, illustrate how time shifts can be observed and quantified, confirming the predictions of relativistic theories. The article concludes by inviting deeper reflection on the concept of "time", suggesting that traditional models can be overcome in the modern understanding of cosmic and physical phenomena. The conclusion calls for a philosophical reassessment of the notion of time in the light of relativistic discoveries.

Keywords : Relativistic Time Effects (RTE), Relativity, Eigen duration, Relativistic experiments, Space-time.

Cet article se concentre sur les effets temporels relativistes (ETR), qui sont des phénomènes mesurables par les horloges, surpassant les prévisions de la physique newtonienne tout en étant concordants avec la relativité. Les ETR, qui incluent des décalages et des délais, sont classifiés selon leur origine cinématique ou gravitationnelle, avec des implications significatives en astrophysique, cosmologie et applications pratiques telles que le GPS. Le texte explore les différences conceptuelles fondamentales entre la perception newtonienne et les réalités de l'espace-temps relatifs, mettant en lumière la nature de la durée propre, mesurable uniquement dans le cadre d'une histoire particulière. Des expériences emblématiques, comme celle de Hafele-Keating et celle de Pound-Rebka, illustrent comment les décalages

temporels peuvent être observés et quantifiés, confirmant ainsi les prédictions des théories relativistes. L'article termine en invitant à une réflexion plus profonde sur le concept de « temps », suggérant que les modèles traditionnels peuvent être dépassés dans la compréhension moderne des phénomènes cosmiques et physiques. La conclusion appelle à une réévaluation philosophique de la notion de temps à la lumière des découvertes relativistes.

Mots-clés : *Effets du temps relativiste (ETR), Relativité, Durée propre, Expériences relativistes, Espace-temps.*

Questo articolo si concentra sugli effetti temporali relativistici (RTE), fenomeni che possono essere misurati dagli orologi, superando le previsioni della fisica newtoniana pur essendo coerenti con la relatività. Gli ETR, che comprendono spostamenti e ritardi, sono classificati in base alla loro origine cinematica o gravitazionale, con implicazioni significative per l'astrofisica, la cosmologia e le applicazioni pratiche come il GPS. Il testo esplora le fondamentali differenze concettuali tra la percezione newtoniana e le realtà dello spazio-tempo relativo, evidenziando la natura stessa della durata, misurabile solo nel contesto di una particolare storia. Esperimenti emblematici, come quelli di Hafele-Keating e Pound-Rebka, illustrano come sia possibile osservare e quantificare gli spostamenti temporali, confermando le previsioni delle teorie relativistiche. L'articolo si conclude invitando a una riflessione più approfondita sul concetto di "tempo", suggerendo che i modelli tradizionali possono essere superati nella moderna comprensione dei fenomeni cosmici e fisici. La conclusione invita a una rivalutazione filosofica della nozione di tempo alla luce delle scoperte relativistiche.

Parole chiave : *Effetti del tempo relativistico (RTE), Relatività, Durata autoctona, Esperienze relativistiche, Spazio-tempo.*

Sébastien Bize et Pacome Delva

La réalisation des références spatio-temporelles

In this article, we show how the two major revolutions of theoretical physics in the 20th century – quantum physics and general relativity – have shaped our modern spatio-temporal reference systems and their realizations. On the one hand, the development of quantum physics enabled the invention of atomic clocks and the linking of the second, the unit of physical time, to a physical quantity postulated as universal: a transition frequency of the Caesium atom. On the other hand, general relativity allowed for the development of the conceptual framework in which the durations measured by a set of clocks are related to a global coordinate time, whose realization permits the establishment of international time scales. We will also show how the construction and materialization of spatio-temporal references can fit into a Bachelardian interpretation through the concept of phenomenotechnique. The connection between clock measurements and international time scales depends on a geometric model of space-time. In order to establish agreement on international time scales, international organizations have defined conventional geometric models of space-time, which implicitly define the conventional spatio-temporal reference frames. These organizations are the Union Astronomique Internationale (UAI) and the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM).

Thus, the conceptual framework of spatio-temporal reference frames, developed from physical theories, is materialized by a set of time or frequency measurements according to well-documented experimental protocols and international conventions. The agreement between these measurements and the predictions of measurements calculated within the conceptual framework tells us that our conceptual framework is a "good" description of reality. The study of this agreement is the subject of metrology. However, it often happens

that our measurements do not correspond to the predictions, which gives metrology a heuristic power, and can lead to the discovery of a new physical law, or a better description of our measurement instruments and experimental procedures, or even challenge the conceptual framework and its underlying physical theory. We will describe two examples of this heuristic metrological approach: the historical experiment of the astronomers' pendulum, and its modern counterpart with atomic clocks.

Keywords: *quantum physics, general relativity, spatio-temporal reference, metrology, international time scales*

Nous montrons dans cet article comment les deux grandes révolutions de la physique théorique du $xx^{\text{ème}}$ siècle – la physique quantique et la relativité générale – ont façonné nos systèmes de références spatio-temporelles modernes et leurs réalisations. D'une part, le développement de la physique quantique a permis l'invention des horloges atomiques et de relier la seconde, l'unité de temps physique, à une grandeur physique postulée comme universelle : une fréquence de transition de l'atome de Césium. D'autre part, la relativité générale a permis de développer le cadre conceptuel dans lequel relier les durées mesurées par un ensemble d'horloges avec un temps-coordonnée global, dont la réalisation permet l'établissement des échelles de temps internationales. Nous montrerons aussi comment la construction et la matérialisation des références spatio-temporelles peut s'inscrire dans une interprétation bachelardienne au travers du concept de phénoménoteknique. Le lien entre les mesures des horloges et les échelles de temps internationales dépend d'un modèle géométrique de l'espace-temps. Afin d'établir une entente sur les échelles de temps internationales, des organismes internationaux ont défini des modèles géométriques conventionnels de l'espace-temps, définissant implicitement les référentiels spatio-temporel conventionnels. Ces organismes sont l'Union Astronomique Internationale (UAI) et le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM).

Ainsi, le cadre conceptuel des référentiels spatio-temporels, élaboré à partir des théories physiques, est matérialisé par un ensemble de mesures de temps ou de fréquence selon des protocoles expérimentaux bien documentés et des conventions internationales. L'accord entre ces mesures et les prédictions des mesures calculées dans le cadre conceptuel nous renseigne sur le fait que notre cadre conceptuel est une « bonne » description de la réalité. L'étude de cet accord est l'objet de la métrologie. Cependant, il arrive souvent que nos mesures ne correspondent pas à leur prédiction, ce qui confère un pouvoir heuristique à la métrologie, et qui peut mener à la découverte d'une nouvelle loi physique, à une meilleure description de nos instruments de mesures et de nos procédures expérimentales, voire à remettre en cause le cadre conceptuel et donc la théorie physique sous-jacente. Nous décrirons deux exemples de cette démarche heuristique métrologique : l'expérience historique du pendule des astronomes, et son pendant moderne avec des horloges atomiques.

Mots-clés: *physique quantique, relativité générale, référence spatio-temporelle, métrologie, échelles de temps internationales*

In questo articolo mostriamo come le due grandi rivoluzioni della fisica teorica del xx secolo – la fisica quantistica e la relatività generale – abbiano plasmato i nostri sistemi di riferimento spazio-temporali moderni e le loro realizzazioni. Da una parte, lo sviluppo della fisica quantistica ha permesso l'invenzione degli orologi atomici e di collegare il secondo, l'unità di tempo fisico, a una grandezza fisica postulata come universale: una frequenza di transizione dell'atomo di cesio. Dall'altra parte, la relatività generale ha permesso di sviluppare il quadro concettuale in cui collegare le durate misurate da un insieme di orologi con un tempo-coordinata globale, la cui realizzazione consente l'isti-

tuzione delle scale temporali internazionali. Mostriamo anche come la costruzione e la materializzazione dei riferimenti spazio-temporali possano iscriversi in un'interpretazione bachelardiana attraverso il concetto di fenomenotecnica. Il legame tra le misure degli orologi e le scale temporali internazionali dipende da un modello geometrico dello spazio-tempo. Per stabilire un accordo sulle scale temporali internazionali, alcuni organismi internazionali hanno definito i modelli geometrici convenzionali dello spazio-tempo, definendo implicitamente i riferimenti spazio-temporali convenzionali. Questi organismi sono Union Astronomique Internationale (UAI) e il Bureau International des Poids et Mesures (BIPM).

Così, il quadro concettuale dei riferimenti spazio-temporali, elaborato a partire dalle teorie fisiche, si materializza grazie a un insieme di misure di tempo o di frequenza che seguono protocolli sperimentali ben documentati e convenzioni internazionali. L'accordo tra queste misure e le previsioni delle misure calcolate entro il quadro concettuale ci informa che il nostro quadro concettuale è una "buona" descrizione della realtà. Lo studio di questo accordo costituisce l'oggetto della metrologia. Tuttavia, accade spesso che le nostre misure non corrispondano alle previsioni, il che conferisce alla metrologia un potere euristico, e può portare alla scoperta di una nuova legge fisica, a una migliore descrizione dei nostri strumenti di misura e delle nostre procedure sperimentali, o addirittura a rimettere in discussione il quadro concettuale e quindi la teoria fisica che gli è sottesa. Descriveremo due esempi di questo approccio euristico metrologico: l'esperimento storico del pendolo degli astronomi e il suo equivalente moderno degli orologi atomici.

Parole chiave: *fisica quantistica, relatività generale, riferimento spaziotemporale, metrologia, scale temporali internazionali*

Gianna Panfilò

Temps universel ou temps international ?

The *Bureau International des poids et mesures* (BIPM) is an international organization which role is to facilitate the standardization of measurements. In particular, the *Time Department* of the BIPM is responsible for the calculation and the publication of the *Coordinated Universal Time* (UTC) and of its rapid solution called *UTCr*. UTC is calculated with optimized algorithms using atomic clocks data compared by time links. UTC is the world time reference and can be considered an "Universal" and an "International" time scale. UTC is also used in multiple applications spread from the telecommunication, transports, Earth and space sciences need precise timing for observation, research, and modelling.

Keywords: UTC, stability, accuracy, universality, international.

Le *Bureau International des poids et mesures* (BIPM) est une organisation internationale dont le rôle est de faciliter la normalisation des mesures. Le *Département du Temps* du BIPM est notamment responsable du calcul et de la publication du *Temps Universel Coordonné* (UTC) et de sa solution rapide appelée *UTCr*. UTC est calculé avec des algorithmes optimisés utilisant les données d'horloges atomiques comparées par transfert de temps. UTC est la référence temporelle mondiale et peut être considérée comme une échelle de temps "universelle" et "internationale". UTC est également utilisé dans de multiples applications dans les domaines des télécommunications, des transports, des sciences de la Terre et de l'espace qui nécessitent des mesures de temps précis pour l'observation, la recherche et la modélisation.

Mots-clés : UTC, stabilité, exactitude, universalité, international.

Il *Bureau International des poids et mesures* (BIPM) è un'organizzazione internazionale il cui ruolo è facilitare la standardizzazione delle misure. In particolare il Dipartimento di Tempo del BIPM è responsabile del calcolo e della pubblicazione del Tempo Coordinato Universale (UTC) e della sua soluzione rapida denominata UTCr. UTC viene calcolato con algoritmi ottimizzati utilizzando i dati degli orologi atomici confrontati tramite collegamenti orari. UTC è il riferimento temporale mondiale e può essere considerata una scala temporale "universale" e "internazionale". UTC è utilizzato anche in molteplici applicazioni, dalle telecomunicazioni, ai trasporti, alle scienze della Terra e dello spazio, che necessitano misure di tempo precise per la ricerca e la modellizzazione.

Parole chiave: UTC, stabile, accurato, universale, internazionale.

Clément Lacroûte

De la phénoménotechnique à l'idéologie matérialisée : pourquoi la science fabrique-t-elle le monde ?

This article takes into consideration the theses of Gaston Bachelard presented in *Le nouvel esprit scientifique* (1934) and *La philosophie du non* (1940) to address the question: why does science construct the world? Taking seriously the concept of a *science réalisante* ("realizing science"), it seeks to reassess this idea in light of the challenges of the 21st century. Science and technology emerge as the primary sources of our material environment, a phenomenon that can be interpreted through Marxian approaches developed in the second half of the 20th century.

The analysis focuses on a critique of Bachelard's concept of *phénoménotechnique*, putting it into dialogue with the notions of materialized ideology, developed by Guy Debord in the 1960s, and real abstractions, central to the critique of value-dissociation. While a connection between Bachelard and Debord has been previously suggested concerning *La poétique de l'espace* and the Situationist practice of the *dérive*, this study shifts its focus to *phénoménotechnique*.

Drawing on my research experience in the field of frequency metrology and atomic clocks, this article offers a perspective that links scientific practice with the broader historical and social context of modernity. By employing Debordian and Marxian concepts, the study aims to explore the contemporary relevance of *phénoménotechnique* and its potential for understanding the active role of science in shaping the material world.

Keywords: *Gaston Bachelard, Guy Debord, Situationism, phenomenotechnique, materialism.*

Cet article analyse les thèses de Gaston Bachelard exposées dans *Le nouvel esprit scientifique* (1934) et *La philosophie du non* (1940) afin de répondre à la question : pourquoi la science fabrique-t-elle le monde ? En prenant au sérieux l'idée d'une *science réalisante*, il s'agit de la réexaminer à la lumière des défis du XXI^e siècle. Science et technologie apparaissent comme les principales sources de notre environnement matériel, un phénomène qui peut être interprété à travers des approches d'inspiration marxienne développées dans la seconde moitié du XX^e siècle. L'analyse se concentre sur la critique de la notion bachelardienne de *phénoménotechnique*, en la mettant en dialogue avec les concepts d'idéologie matérialisée, élaboré par Guy Debord à partir des années 1960, et d'abstractions réelles, centrales dans la critique de la valeur-dissociation. Bien qu'un lien entre Bachelard et Debord ait déjà été suggéré en relation avec *La poétique de l'espace* et la pratique situationniste de la *dérive*, l'attention est ici portée sur le concept de *phénoménotechnique*. En m'appuyant sur mon expérience de recherche dans le domaine de la métrologie des fréquences et des horloges atomiques, cette étude propose une perspective qui relie la pratique scientifique au contexte

historico-social de la modernité. À travers l'utilisation de concepts debordiens et marxien, il s'agit d'explorer la pertinence contemporaine de la *phénoménoteknikue*.

Mots-clés: *Gaston Bachelard, Guy Debord, situationisme, phénoménoteknikue, materialisme*

Questo contributo analizza le tesi di Gaston Bachelard esposte ne *Il nuovo spirito scientifico* [*Le nouvel esprit scientifique*] (1934) e *La filosofia del non* [*La philosophie du non*] (1940) per rispondere alla domanda: perché la scienza costruisce il mondo? Prendendo sul serio l'idea di una *science réalisante*, si propone di riesaminarla alla luce delle sfide del XXI secolo. Scienza e tecnologia appaiono come le principali fonti del nostro ambiente materiale, un fenomeno che può essere interpretato attraverso approcci di matrice marxiana sviluppati nella seconda metà del XX secolo. L'analisi si concentra sulla critica della nozione bachelardiana di *phénoménoteknikue*, mettendola in dialogo con i concetti di ideologia materializzata, elaborato da Guy Debord a partire dagli anni Sessanta, e di astrazioni reali, centrali nella critica del valore-dissociazione. Sebbene un legame tra Bachelard e Debord sia stato già suggerito in relazione a *La poetica dello spazio* [*La poétique de l'espace*] e alla pratica situazionista della deriva, l'attenzione è orientata verso il concetto di *phénoménoteknikue*. Partendo dalla mia esperienza di ricerca nel campo della metrologia delle frequenze e degli orologi atomici, si propone una prospettiva che collega la pratica scientifica con il contesto storico-sociale della modernità. Attraverso l'uso di concetti debordiani e marxiani, si intende esplorare la rilevanza contemporanea della *phénoménoteknikue*.

Parole chiave: *Gaston Bachelard, Guy Debord, situazionismo, fenomenotecnica, materialismo*

Bernard Nicquevert

Boson et vérité : donner du sens à la recherche. A l'attention de l'Association Internationale Gaston Bachelard

In Véronique Bizot's novel *Mon couronnement*, the 87-year-old narrator experiences a life upheaval as unexpected visitors arrive to congratulate him on a long-forgotten scientific discovery. Initially dismissed as a dead end, the discovery now holds potential to address an emerging health issue. Invited to his "coronation," the protagonist ultimately chooses not to attend. The novel explores three primary motivations behind scientific research: the desire for glory, societal application, and the pursuit of truth. These themes resonate with the story of the Higgs boson discovery. Peter Higgs, celebrated at 84 years old in 2013, made a theoretical breakthrough in 1964 about the origin of subatomic particle mass, developed with Brout and Englert. This mechanism explains why some particles have mass. The Standard Model of physics describes matter as composed of quarks, electrons, and neutrinos, interacting through four fundamental forces: gravity, electromagnetic force, strong nuclear force, and weak nuclear force. Each force is associated with a specific boson. The Higgs mechanism introduces the Higgs boson, essential for explaining particle mass. Higgs and his colleagues sought scientific truth rather than immediate applications. Decades later, the Higgs boson's existence was experimentally confirmed by CERN's LHC in 2012, validating the theoretical prediction and earning Higgs and Englert the Nobel Prize in Physics in 2013. Fundamental research, driven by the quest for truth, progresses through peer validation and rigorous experiments. The discovery of the Higgs boson underscores the importance of perseverance, international collaboration, and the scientific method in advancing human knowledge.

Keywords: *Higgs boson, scientific research, discovery, truth, collaboration.*

Dans le roman *Mon couronnement* de Véronique Bizot, le narrateur, âgé de 87 ans, voit sa vie bouleversée par des visiteurs inattendus venus le féliciter pour une découverte scientifique oubliée. Initialement considérée comme une impasse, cette découverte offre désormais de nouvelles perspectives sur un problème développé en parallèle par Brout et Englert. Invité à son «couronnement», le protagoniste choisit finalement de ne pas y participer. Le roman explore trois motivations principales de la recherche scientifique : l'appétit de gloire, l'application sociétale et la quête de la vérité. Ces thèmes résonnent avec l'histoire de la découverte du boson de Higgs. Peter Higgs, célébré à 84 ans en 2013, fit une percée théorique en 1964 sur l'origine de la masse des particules subatomiques, développée avec Brout et Englert. Ce mécanisme explique pourquoi certaines particules ont une masse. Le Modèle standard de la physique décrit la matière comme composée de quarks, d'électrons et de neutrinos, interagissant par quatre forces fondamentales : la gravité, la force électromagnétique, la force nucléaire forte et la force nucléaire faible. Chaque force est associée à un boson spécifique. Le mécanisme de Higgs introduit le boson de Higgs, essentiel pour expliquer la masse des particules. Higgs et ses collègues cherchaient la vérité scientifique, non des applications immédiates. Des décennies plus tard, l'existence du boson de Higgs fut confirmée expérimentalement par le LHC du CERN en 2012, validant la prédiction théorique et valant à Higgs et Englert le prix Nobel de physique en 2013. La recherche fondamentale, motivée par la quête de la vérité, progresse grâce à la validation par les pairs et à des expériences rigoureuses. La découverte du boson de Higgs souligne l'importance de la persévérance, de la collaboration internationale et de la méthode scientifique dans l'avancement des connaissances humaines.

Mots-clés : *Boson de Higgs, recherche scientifique, découverte, vérité, collaboration.*

Nel romanzo breve *Mon couronnement* di Véronique Bizot, il narratore di 87 anni vede la sua vita sconvolta da visitatori inattesi venuti a congratularsi per una scoperta scientifica dimenticata. Inizialmente considerata un vicolo cieco, la scoperta ora offre nuove prospettive su un problema sviluppato in parallelo da Brout e Englert. Invitato al suo "coronamento," il protagonista sceglie di non partecipare. Il romanzo esplora tre motivazioni principali della ricerca scientifica: l'appetito di gloria, l'applicazione sociale e la ricerca della verità. Questi temi si ritrovano nella storia della scoperta del bosone di Higgs. Peter Higgs, celebrato a 84 anni nel 2013, fece un'innovazione teorica nel 1964 sull'origine della massa delle particelle subatomiche, sviluppata con Brout ed Englert. Questo meccanismo spiega perché alcune particelle hanno massa. Il Modello standard della fisica descrive la materia come composta da quark, elettroni e neutrini, che interagiscono tramite quattro forze fondamentali: gravità, forza elettromagnetica, forza nucleare forte e forza nucleare debole. Ogni forza è associata a un bosone specifico. Il meccanismo di Higgs introduce il bosone di Higgs, essenziale per spiegare la massa delle particelle. Higgs e i suoi colleghi cercavano la verità scientifica, non applicazioni immediate. Decenni dopo, l'esistenza del bosone di Higgs fu confermata sperimentalmente dal LHC del CERN nel 2012, validando la predizione teorica e valendo a Higgs e Englert il premio Nobel per la fisica nel 2013. La ricerca fondamentale, motivata dalla ricerca della verità, avanza grazie alla validazione dei pari e ad esperimenti rigorosi. La scoperta del bosone di Higgs evidenzia l'importanza della perseveranza, della collaborazione internazionale e del metodo scientifico nel progresso delle conoscenze umane.

Parole chiave: *Bosone di Higgs, ricerca scientifica, scoperta, verità, collaborazione.*

