

La création scientifique selon Poincaré et Einstein*

Michel PATY**

RESUME

Poincaré et Einstein fondent leur conception de la découverte et de l'invention scientifique comme un processus créateur sur le « libre choix » des concepts et des idées théoriques par la pensée. Cette « liberté logique » par rapport aux données factuelles s'établit sur la critique humienne de l'induction, sur le refus de l'empirisme pur et sur une conception de l'intelligibilité rationnelle tributaire de Kant, en même temps que sur la critique de l'apriorisme kantien. Soulignant la proximité de leurs convictions à cet égard, malgré des conceptions philosophiques différentes sous d'autres aspects (conventionalisme de Poincaré, réalisme critique d'Einstein), nous examinons comment ce trait central des épistémologies des deux *savants-philosophes* se situe par rapport à d'autres penseurs, du passé comme de leur époque, et comment il a été rendu possible par l'évolution des mathématiques et de la physique dans la période immédiatement antérieure. Nous tentons de le mettre en relation avec les processus de l'invention scientifique tels qu'ils en ont fait eux-mêmes l'expérience dans leurs innovations créatrices.

Abstract. SCIENTIFIC CREATION ACCORDING TO POINCARÉ AND EINSTEIN

Poincaré and Einstein based their conception of scientific discovery and invention as creative process on the «free choice» by thought of theoretical concepts and ideas. This «logical freedom» with respect to factual data is settled on the human critique of induction, on a refusal of pure empiricism, and on a conception of rational intelligibility indebted to Kant but combined at the same time with a critique of kantian apriorism. We emphasize the proximity of their convictions in this respect, despite differences in their philosophical ideas in other matters (Poincaré's conventionalism, Einstein's critical realism), and we compare this central feature of the two scientists-philosophers' epistemologies with others conceptions taken from thinkers of the past as well as contemporary to them. We consider also how this common interest and epistemological attitude had been made possible by the evolution of mathematics and of physics in the immediately preceding period. We try to put these in connection with the processes of scientific invention as experienced by themselves in their creative innovations.

MOTS-CLES : épistémologie, philosophie, histoire des idées, mathématiques, physique, rationalité, invention, création scientifique, Poincaré, Einstein.

KEY WORDS : Epistemology, philosophy, history of ideas, mathematics, physics, rationality, invention, scientific creation, Poincaré, Einstein.

* Une première version de ce travail a fait l'objet d'une conférence, prononcée en langue portugaise, à l'occasion de la création de la Catédra (Chaire) Mario Schenberg, Instituto de Estudos Avançados, Universidade de São Paulo, le 7 novembre 1997.

** Directeur de recherche au CNRS, Equipe REHSEIS (UMR 7596), CNRS, et Université Paris 7-Denis Diderot (37 rue Jacob, F-75006 Paris). Courrier-él : paty@paris7.jussieu.fr

*A Alberto Luiz da Rocha Barros
In memoriam*

1

CONFLUENCES

Henri Poincaré et Albert Einstein, malgré des différences significatives dans leurs philosophies respectives de la connaissance scientifique (le premier conciliait à sa manière des éléments d'empirisme et de conventionalisme, tandis que le second professait un réalisme et un rationalisme critiques), avaient en commun cette conviction (parmi plusieurs autres), d'une importance centrale par rapport au sujet qui nous occupe ici, que les idées scientifiques, dans l'élaboration des théories physiques et mathématiques, sont des "libres constructions de la pensée". Ils l'entendaient en ce sens qu'elles ne sont pas induites de manière logique et univoque, nécessaire et contraignante, des données de l'expérience, et qu'elles ne sont pas davantage inscrites dans une structure innée ou *a priori* de la pensée. C'est dans cet espace de liberté que l'idée de création, dans le travail scientifique qui mène à la découverte, fait son entrée. Poincaré et Einstein ont tous deux insisté de la manière la plus nette sur cet aspect qui était, à leur yeux, le caractère le plus important de l'activité de connaissance, et qui fut effectivement au centre de leurs épistémologies.

Il est important, en effet, de saisir directement, lorsque cela est possible, les rapports effectifs entre des problèmes relevant de la philosophie de la connaissance et l'activité de connaissance elle-même. La connaissance scientifique ne se ramène pas seulement à ses contenus assurés, à ses propositions et à ses effets, et elle comprend parmi ses dimensions le travail même de la pensée qui l'établit. A cet égard, le témoignage de créateurs scientifiques exceptionnels comme Poincaré et Einstein est évidemment irremplaçable. Il est d'autant plus significatif, que ces savants étaient tous deux véritablement philosophes, en ce sens que leur tournure d'esprit les portait à se poser philosophiquement des questions de nature philosophique¹.

Le thème de l'invention, de la « création », dans le domaine de la pensée scientifique, apparaît en fait directement lié à toutes les autres questions philosophiques posées par la science en tant qu'elle est « pensée », activité intellectuelle éminemment rationnelle, ayant son siège, avant toute communication ou jugement consensuel, dans des intelligences singulières, subjectives. On conçoit, en particulier, que l'activité créatrice de la pensée rationnelle est conditionnée par l'intelligibilité des « objets » qui sont proposés à sa compréhension et à ses jugements. On ne peut manquer, à ce propos, de retourner, fût-ce brièvement, à Descartes et aux philosophes qui se sont après lui préoccupés

¹ Paty [1993a ; à paraître, a ; en préparation, a].

des conditions de possibilité d'une connaissance rationnelle, pour les critiquer, comme Hume, ou les établir, avec Kant.

Et cependant, la philosophie, celle des philosophes comme celle des scientifiques (ou des « savants »), s'est, dans l'ensemble, peu préoccupée de la dimension créatrice de la pensée scientifique : d'une part, probablement, à cause d'une conception de la science qui voyait cette dernière dans des formes achevées, « vraies » ou « certaines », plutôt que comme un travail en constant remaniement ; mais aussi, sans doute, en raison de l'apparente contradiction de s'intéresser à des vérités objectives tout en attachant de l'importance aux subjectivités qui en sont la source (et qui ne cessent, en vérité, d'en être le siège). Nous évoquerons dans ce sens quelques doctrines philosophiques jusqu'à la période qui nous intéresse, celle de Poincaré et d'Einstein. Parallèlement à cette relative indifférence philosophique à l'égard de l'invention et de la création scientifiques, on constate par ailleurs, au long du XIX^e siècle, à la faveur des nouveaux développements des connaissances scientifiques, notamment en mathématiques et en physique, la mise en place de conditions intellectuelles propres à favoriser sa prise en compte.

Ces évocations nous permettront de voir comment les pensées de Poincaré et d'Einstein sur la création scientifique se situent au confluent de ces nouvelles perspectives (de leurs leçons sur la nature des propositions de la science) et de la pensée critique de la philosophie, orientée par ailleurs vers d'autres projets. La conscience aiguë du sens de leur propre recherche aura favorisé leur regard réflexif, les amenant à s'interroger sur le travail de leur propre pensée, faisant la jonction, encore inédite semble-t-il, entre l'expérience créatrice et la pensée de ses conditions philosophiques. Après l'évocation de cette expérience telle qu'ils ont pu eux-mêmes, chacun, la rapporter, nous examinerons comment ils la reliaient à leurs conceptions philosophiques respectives, témoignant en fin de compte pour l'inscription rationnelle de l'invention et de la création scientifiques, et donc pour leur pleine portée philosophique.

2

INVENTION ET INTELLIGIBILITE

Les philosophes, et parmi eux souvent ceux-là même qui furent en même temps des chercheurs scientifiques (les « savants-philosophes »), se sont surtout intéressés, à propos de la science, à la nature de celle-ci sous les espèces de ce qui fait sa vérité et désigne l'erreur. Bien qu'eux-mêmes créateurs, ils semblent ne s'être attachés qu'assez peu à leurs propres actes d'invention ou de découverte en tant que création, et ils ne les considéraient d'ailleurs généralement pas comme tels. Les problèmes qui les préoccupaient étaient plutôt ceux de la compréhension ou de l'intelligibilité des propositions énoncées, et de leur justification logique et rationnelle.

Descartes lui-même est un bon témoin du mouvement de cette pensée

philosophique, soucieuse de parvenir à la justification des raisons dans la recherche de vérités, sans beaucoup se préoccuper des circonstances des découvertes et des voies par lesquelles l'esprit parvient à se forger des certitudes et se laisse illuminer par l'évidence. La raison devait, selon lui, se défier de l'imagination, et la doctrine de la connaissance se garder de mettre cette dernière en avant. Et cependant, Descartes, plus que tout autre, faisait une grande place à l'*intuition*, puisque c'était, à ses yeux, dans l'intuition que se produit l'illumination de l'évidence qui constituait, pour lui, le moment de la compréhension, prolongée par le raisonnement qui appelle la déduction et la mémoire et se rattache à l'évidence par la constitutions de certitudes. Mais il s'agissait d'une intuition rationnelle comprise avant tout comme une fonction synthétique de l'entendement².

Dès les *Règles pour la direction de l'esprit*, Descartes établit ce que devaient être à ses yeux les conditions de l'intelligibilité, et elles incluent les conditions de l'invention (qui étaient plutôt, pour lui, de l'ordre de la découverte), puisque toute compréhension par un sujet est, dans une certaine mesure, ré-invention ; cela étant, il les renvoyait aussitôt à l'énoncé de la méthode³. Au point d'ailleurs, de s'arrêter dans la rédaction des *Regulæ*, en les laissant inachevées, pour exposer près de dix années plus tard un *Discours de la Méthode* pleinement organisé⁴. Il y est fait bonne place à l'expérience de la connaissance, et l'on y cherche à comprendre les fondements de la certitude à quoi elles aboutissent. Les objets de cette connaissance, tout en portant des éléments neufs (pour nous), étaient considérés comme déjà présents de toute éternité : en découvrant, nous *accédons* à la *vérité*, d'essence éternelle et divine.

Descartes ne niait pas pour autant l'invention comme capacité de l'intellect, mais désirait la soumettre à des critères normatifs, à la « méthode ». Son attitude par rapport à ses propres innovations est caractéristique à cet égard. S'il déclarait que les courbes mécaniques (ou transcendantes) n'appartiennent pas à sa *Géométrie*⁵, livre accompagnant le *Discours de la méthode* comme son illustration, c'était en raison de la définition qu'il avait proposée des courbes géométriques (ou algébriques), à savoir qu'elles pouvaient être engendrées par une seule transformation finie et continue d'un point à un autre à partir d'un ligne droite ou d'un cercle. Mais cela ne l'avait pas empêché d'étudier, en faisant preuve de la plus grande inventivité, des courbes mécaniques (par exemple, la cycloïde⁶), y compris en développant des raisonnements préfigurant certains aspects du calcul différentiel et intégral.

Il ne s'agissait pas vraiment, pour lui, de découverte, mais plutôt d'*expérience*, au sens de faire l'expérience, ou l'exercice, du raisonnement. La découverte au sens propre qu'il se reconnaissait, quant à lui, était celle de la méthode. Ce qui méritait à ses yeux le qualificatif de découverte ou d'invention, était, pourrait-on dire, de l'ordre du méta-scientifique, c'est-à-dire du philosophique

² Paty [1997].

³ Descartes [1628].

⁴ Descartes [1637a]. Après, toutefois, l'ébauche, très avancée mais également abandonnée, du *Monde* ou *Traité de la lumière* (Descartes [1633]).

⁵ Descartes [1637b].

⁶ Descartes, Lettres au Père Marin Mersenne, 27 mai 1638 et 23 août 1638, in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 2, p. 134-137, 307-320.

(en prenant ces termes dans leur sens actuel). Et son illumination de l'automne 1619, qui le détermina dans sa vocation, fut précisément de cet ordre, transcendant en les généralisant pour la philosophie, ses innovations mathématiques⁷.

Si nous avons privilégié ici Descartes, c'est qu'il fut, parmi les penseurs classiques, celui qui se préoccupa le premier de l'activité de la pensée rationnelle dans la singularité d'une subjectivité⁸. Il faudrait évoquer ensuite les doctrines qui se sont attachées à décrire les processus cognitifs ou à établir leurs conditions, en faisant la part des impressions des sens et de la sensibilité dans la formation des idées, de Locke à Condillac, Berkeley, Diderot, d'Alembert, Hume, Kant..., et aux penseurs suivants, du XIX^e siècle (d'Ampère à Helmholtz, Mach, Pierce, W. James...), jusqu'aux deux auteurs qui nous occupent ici.

Mais nous ne voulons pas faire une histoire des idées sur la création scientifique. Notons seulement que les philosophes qui se sont intéressés à la *création* la rapportaient en général aux activités qui ressortissaient directement de l'*imagination*, c'est-à-dire les *arts*, en conformité, en fin de compte, avec la classification traditionnelle des activités mentales selon les trois "facultés de l'âme", mémoire, raison, imagination⁹. Il est vrai qu'un Diderot, par exemple, plaçait l'imagination aussi parmi les premières ressources de la pensée des sciences de la nature, mais au prix de favoriser exclusivement les sciences empiriques, en s'appuyant sur le recours aux analogies, revenant à l'induction baconienne, et dépréciant les mathématiques et la physique rationnelle, dont il estimait "le règne terminé"¹⁰.

Les sciences, au XIX^e siècle, étaient, en règle générale, considérées en fonction de leurs objets conçus suivant leurs « véritables rapports », ce que sous-tendait l'idée d'une « classification naturelle »¹¹, et cette préoccupation quasiment exclusive reléguait au second plan, ou même occultait, la question des voies par lesquelles ces rapports étaient portés au jour par le travail de la pensée des savants. Les contenus scientifiques importaient avant tout, et la science était souvent conçue d'une manière normative, selon un schème de pensée accentué et systématisé par la philosophie positiviste¹². Concernant en particulier les contenus des mathématiques et de la physique, sous-jacente à l'idée de découverte se tenait celle de la *naturalité* de la *chose découverte*, déjà présente en puissance, mais non encore identifiée, qui nous est *donnée*, au terme d'un processus de pensée, plutôt qu'elle n'est réellement *inventée*. Ou, si elle l'était, ce ne serait encore qu'au titre d'une pensée servante d'un ordre qui la dépasse, et c'était cet ordre qui intéressait la philosophie.

Ou encore, lorsque ces contenus de connaissance, ces *savoirs*, étaient admis comme objets d'invention d'une subjectivité, il fallait s'efforcer -tel était le premier but de la science-, de faire disparaître ce "coefficient individuel rencontré chez tout individu dans l'acte de connaissance", quitte à admettre qu'il demeure

⁷ Voir l'évocation qu'en a donné Descartes lui-même dans le *Discours de la méthode* (Descartes [1737a]).

⁸ Cf. Paty [1997].

⁹ Voir, p. ex., le « Système figuré des connaissances » accompagnant la publication du premier volume de l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert (d'Alembert & Diderot [1751-1780]), avec le *Discours préliminaire* de ce dernier (d'Alembert [1751]).

¹⁰ Voir, p. ex., Diderot [1753]. Cf. Paty [1977], chapitre 4, p. 175-179.

¹¹ Ampère [1834], p. 4.

¹² Comte [1830-1842].

toujours au bout du compte dans la vérité de la science une irréductible dimension humaine¹³.

L'intérêt pour les processus mentaux en rapport aux impressions des sens et pour la description psychologique des fonctions intellectuelles s'accrut considérablement dans la seconde moitié du XIX^e siècle, à la faveur du développement des recherches sur la physiologie de la perception (avec notamment Hermann von Helmholtz¹⁴), sur la psychophysiologie des sensations (avec Ernst Mach¹⁵), et de l'avènement de la psychologie, à laquelle se réfèrent volontiers les scientifiques aussi bien que les philosophes (William James, Théodore Ribot¹⁶, Henri Bergson, son disciple Edouard Le Roy, etc...). Cette circonstance contribua aussi, indéniablement, à favoriser le déserrement épistémologique entre le conceptuel et l'empirique, comme on le voit, par exemple, dans les épistémologies de Helmholtz et de Mach eux-mêmes. Elle favorisa, de même, surtout par le biais de la psychologie, un intérêt pour les processus de l'invention dans la pensée commune ou scientifique.

Ce qui retenait cependant surtout l'attention, c'étaient les mécanismes de la pensée considérés pour eux-mêmes plutôt que les effets de cette invention sur la connaissance. La plupart de ces penseurs professaient une philosophie empiriste ou pragmatiste et, s'ils concevaient bien qu'il y a invention des formes *artificielles* de nos connaissances, celles-ci restaient secondaires à leurs yeux par rapport à la pratique et à l'action. Les théories ne sont que les feuilles provisoires de l'arbre des connaissances, écrivait à peu près Ernst Mach, et il se souciait donc surtout de la critique des concepts indûment posés en absolus¹⁷.

Quant à William James, philosophe du pragmatisme pur¹⁸, de l'«empirisme radical de la pratique», selon l'expression d'Abel Rey¹⁹, c'est à tort qu'on l'accuserait de mettre l'utilité avant la connaissance. Bergson, qui le crédite, à juste titre, de la volonté contraire, reconnaît par ailleurs à sa doctrine l'originalité de voir, dans «une vérité nouvelle», une «invention», au contraire des autres qui n'y reconnaissent qu'une «découverte»²⁰. Cette constatation a partie liée, chez James, à une conception particulière de la vérité. Selon sa doctrine, pour reprendre les mots de Bergson, «la vérité d'ordre intellectuel est une invention humaine qui a pour effet d'utiliser la réalité plutôt que de nous introduire en elle»²¹. Par rapport à notre problème, cette idée d'une vérité qui se constitue vers l'avant, soumise aux «courants de la réalité», aboutit à la vider d'un sens précis dans une situation donnée, lui faisant perdre, en particulier, toute possibilité d'être caractérisée rationnellement.

¹³ Rey [1911], p. 344.

¹⁴ Helmholtz [1882-1895, 1921, 1977].

¹⁵ Mach [1886].

¹⁶ Théodore Ribot, pionnier de la psychologie scientifique, directeur de la *Revue philosophique*, auteur d'un *Essai sur l'imagination créatrice* (Ribot [1900]), professait des vues assez proches de celles de Poincaré. Nous le retrouverons dans la conclusion.

¹⁷ Mach [1883, 1886, 1906].

¹⁸ James [1907, 1909, 1912, 1917].

¹⁹ Rey [1911], p. 79.

²⁰ Dans son texte «Sur le pragmatisme de William James», in Bergson [1934], in [1959], p. 1447.

²¹ *Ibid.*, p. 1449.

La philosophie d'Henri Bergson, malgré une essence toute différente et, d'ailleurs, son insatisfaction d'une telle conception de la vérité, consonne par de nombreux aspects avec le pragmatisme pur de James. Ils ont en commun, en particulier, un anti-intellectualisme, et les vérités qui leur importent sont senties et vécues avant d'être pensées. Sa philosophie de la conscience fondée sur l'expérience intérieure fait une place importante à l'invention, à l'intuition et l'imagination créatrices. Si Bergson critiquait la conception kantienne d'une vérité déjà donnée dans l'enveloppe du réel²², il voyait, quant à lui, dans l'activité mentale créatrice, avant tout un exemple, de "cette matérialisation croissante de l'immatériel qui est caractéristique de l'activité vitale", et donc une puissance de la nature en devenir²³. Cependant, plus que les autres peut-être, malgré sa minimisation des idées théoriques, il s'attacha aux effets de l'effort mental volontaire sur la formation et l'organisation des idées. Nous reviendrons en conclusion sur certaines de ses remarques, en consonance avec ce que nous aurons vu chez Poincaré et Einstein.

Le philosophe Abel Rey, de son côté, parlait de "l'invention de la science", et en particulier de l'"invention mathématique", et des mathématiques comme "inventions primordiales de [la] raison théorique", tout en insistant sur la distance entre "une telle puissance de possibilités, un telle création de rapports virtuels" et une science du réel²⁴. Il reprenait, de fait, les conceptions de Poincaré sur les mathématiques comme "créations arbitraires de l'esprit, (...) manifestation la plus éclatante de sa fécondité propre", que ce dernier a "inventées" "à l'occasion de l'expérience"²⁵. Tout en présentant la mathématique dont nous disposons comme une création arbitraire de l'esprit, utilisée dans l'expérience et ainsi développée dans la direction que nous connaissons, selon la conception de Poincaré, Rey tenait à souligner la différence de cette dernière avec celle des pragmatistes : pour Poincaré, la science et la raison viennent en premier et "débordent bien loin le champ de l'utilité"²⁶.

D'autres philosophes encore ont fait une place à ces dimensions, comme Emile Meyerson qui s'est attaché à pénétrer «l'énigme du cheminement de la pensée» dans l'activité scientifique comme dans la pensée commune²⁷. Contemporain d'Einstein, on peut dire qu'il ferme cette période ouverte pour la philosophie sur l'invention des idées scientifiques. Nous le retrouverons aussi dans la conclusion.

L'univers philosophique avait fait désormais sa place à l'idée d'une *invention* des formes théoriques, mais rarement en concevant qu'il pouvait s'agir là d'un champ d'investigation pour la philosophie elle-même. On la voyait plutôt comme une dimension ou une circonstance dont il fallait tenir compte, soit pour insister sur sa fragilité ou son caractère relatif, soit pour renforcer les règles de la scientificité, puisque celle-ci avait perdu, pour ainsi dire, ses bases naturelles²⁸.

²² *Ibid.*, p. 1445.

²³ Voir son texte sur «L'effort intellectuel», dans Bergson [1919], *in* [1959], p. 930-959.

²⁴ Rey [1911], p. 71-72.

²⁵ *Ibid.*, p. 76

²⁶ *Ibid.*, p. 78. Faisant désormais sa place à l'invention, voir aussi, p. ex., Le Roy [1905].

²⁷ Meyerson [1931].

²⁸ Voir, plus tardivement, Lalande [1948].

C'est ainsi que, dans la lignée du positivisme et du pragmatisme, mais associés au logicisme, l'empirisme et le positivisme logiques qui fleurirent au XX^e siècle, et leurs héritiers, dissidents ou non, tentèrent d'évacuer de la philosophie l'invention et la création scientifiques comme des moments irrationnels, nécessaires, mais incontrôlables et passagers²⁹. D'autres bâtirent alors pour la connaissance, sur ce *no man's land* philosophique, des doctrines de l'*a-rationalité*³⁰. Mais ceci serait une autre histoire.

3

LA DISTANCIATION DES OBJETS DE PENSÉE.

Que ce soit au XIX^e siècle (et plutôt vers la fin) que l'on ait commencé à prendre conscience de l'invention dans l'activité scientifique n'est probablement pas un hasard : les événements survenus en mathématiques et en physique furent, sans aucun doute, décisifs. C'est, en effet, l'époque où l'on voit se desserrer le lien jusqu'alors étroit que les mathématiques entretenaient avec la nature, où furent inventées des mathématiques qui paraissaient contredire l'« évidence » de l'expérience commune (telles les géométries non-euclidiennes), ou encore purement abstraites ou formelles.

La physique, à partir de la même période, se développait également à travers l'élaboration de théories de plus en plus mathématisées, recourant à des grandeurs d'expression symbolique abstraite à l'image des mathématiques, dont le caractère de construction était plus visible que les formulations antérieures. La constitution de la physique théorique dans ses divers domaines (optique, électricité, magnétisme, thermodynamique), par sa mathématisation analytique sur le mode de la physique mathématique dont la *Mécanique analytique* de Lagrange³¹ représentait la parfaite expression pour la mécanique, laissait voir avec sans cesse plus d'évidence la distance entre les données de l'expérience immédiate et l'abstraction de la théorie formalisée. La mécanique de Hamilton reprenait celle de Lagrange sous un vêtement théorique et conceptuel fort différent, où les grandeurs ne correspondaient plus à des concepts fondés sur des notions communes. L'on admettait désormais comme *principe physique fondamental* une propriété d'apparence très *formelle* comme le principe de moindre action dans son expression variationnelle donnée par Hamilton.

Les données phénoménales les plus importantes échappaient elles-mêmes à la prise de connaissance directe, requérant de constituer des abstractions intermédiaires, concepts ou grandeurs inséparables des mathématiques utilisées pour les concevoir, telles les notions de champ, d'énergie, de potentiel....

²⁹ Voir notamment Reichenbach [1938], mais aussi Popper [1935, 1972]. Sur ce point, voir Paty [1993a], chapitre 1.

³⁰ Je l'entends dans le sens privatif, comme on dit "agnostique". Voir l'anarchisme épistémologique de Paul Feyerabend (Feyerabend [1975]), ou les réductions sociologiques en vogue à la suite de Thomas Kuhn (Kuhn [1970]).

³¹ Lagrange [1788].

En thermodynamique, si le premier principe (la conservation de l'énergie) était encore conforme aux conceptions antérieures de la physique, fondées sur la mécanique, le second, formulé à peu près en même temps, révélait sa nature clairement abstraite et interprétative. Le *second principe de la thermodynamique*, à savoir l'augmentation de l'entropie avec le temps pour des systèmes fermés -exprimant l'irréversibilité des transformations-, se présentait sous une forme éloignée de l'intuition physique immédiate (avant sa traduction dans les termes de la mécanique statistique)³². Il ne s'agissait plus, désormais, d'une description directe des phénomènes comme on le concevait encore pour la mécanique. L'entropie, en effet, était une fonction construite, exprimant une propriété structurale entre des grandeurs, difficile à concevoir simplement, et demandait une interprétation physique qui ne paraissait pas directe ni évidente comme c'était -pensait-on- le cas des autres concepts et principes de la physique.

Mais l'on s'interrogeait aussi sur ces derniers -et sur ceux des mathématiques- même les plus communément admis, comme par exemple, pour la physique, l'espace et la géométrie, le temps et la simultanéité, ou les principes de la mécanique newtonienne, et l'on se rendait compte qu'ils étaient modifiables et susceptibles d'évolutions : ils n'étaient plus conçus comme absolus et naturels, et l'on réalisait leur caractère de constructions par la pensée. En mathématiques, on évoquera encore la notion de groupe, qui paraissait très abstraite, et qui s'avèrerait d'une importance considérable : elle le fut aussi pour la pensée mathématique et épistémologique de Poincaré.

Dès lors se posait le problème de la nature de ces concepts et de ces propositions et principes, de leur statut. Pour les uns, ils se ramenaient à des propositions empiriques. Pour d'autres, il s'agissait de propositions de caractère rationnel, mais qui n'étaient plus *a priori* et inchangeables. Elles étaient rationnelles en tant qu'elles étaient proposées par la pensée pour structurer les données de l'expérience, mais il était toujours possible de les réformer. Quant à leur statut proprement dit, créations de la pensée à partir ou non de données premières, hypothèses, ou choix de conventions, il restait optionnel.

Il n'en fallait pas beaucoup plus pour penser que, au fond, tous les éléments théoriques, y compris ceux qui paraissaient les plus "naturels", étaient, et cela en vérité depuis toujours, construits mentalement sans qu'ils aient été donnés dans une correspondance directe avec des objets et des phénomènes du monde physique. Que l'on pense au temps et à la durée, à l'espace continu, au point matériel sans dimension, et à d'autres concepts de ce genre, exprimés de manière quantitative exacte par des grandeurs mathématiques adéquates. Ces abstractions sont des élaborations de la pensée, mises en correspondance avec des éléments supposés du monde réel, et justifiées par le succès de cette relation. Cette dernière, toutefois, ne concerne pas des éléments isolés, théoriques d'un côté, factuels de l'autre, mais les systèmes que forment ces éléments par leurs relations mutuelles, à savoir, pour les éléments conceptuels, la *théorie* elle-même, et, pour les éléments factuels, le *donné* (lui aussi global) d'expérience approprié à cette mise en rapport.

Ainsi les théories sont construites, inventées et posées par une décision

³² Ces formulations furent l'œuvre de William Thomson (Lord Kelvin), Rudolf Clausius, Ludwig Boltzmann, Willard J. Gibbs... Pierre Duhem signala avec force ce caractère abstrait, qu'il voyait désormais caractéristique des théories physiques (Duhem [1905]).

de la pensée. Cette décision, certes, est orientée, dans le cas de la physique, vers une représentation descriptive et explicative des phénomènes de la nature et, dans le cas des mathématiques, vers la consistance interne des systèmes d'objets construits, de leurs contenus propres. En d'autres termes, la construction, qui résulte d'une invention, est, dans les deux cas, soumise à des contraintes. Mais elle n'en est pas moins invention, création.

Malgré l'ouverture en direction de ces idées en raison des évidences acquises, ce champ de réflexion a été fort peu étudié par la philosophie au cours du siècle qui s'achève, inspirée de façon prédominante, en ce qui concerne la connaissance, par le positivisme et l'empirisme logiques. Sans nier la réalité du moment d'invention, de création, dans le processus d'élaboration scientifique, on le considérait comme échappant au rationnel, et relevant seulement de la psychologie (ou, plus tard, de la sociologie). La distinction entre un «contexte de découverte», et un «contexte de justification» considéré comme seul digne de l'attention de la philosophie, resta largement acceptée jusque récemment. Même un Imre Lakatos estimait nécessaire de «reconstruire rationnellement» les contenus scientifiques après leur découverte, ce qui revenait à les considérer comme fort peu rationnels dans leur surgissement³³. L'invention scientifique échappait ainsi totalement à la philosophie de la connaissance³⁴.

Telle n'était pas la position de Poincaré, bien que les positivistes logiques l'aient considéré comme un de leurs principaux inspirateurs, ni celle d'Einstein, qui insista toujours sur l'aspect de création libre (dans le sens logique) par la pensée humaine des propositions et des concepts scientifiques. Nos deux savants-philosophes font à cette égard figure d'exceptions. C'est en tout cas dans le contexte indiqué de prise de conscience épistémologique de la distance entre les propositions théoriques et les données « immédiates » qu'ils développèrent leurs propres conceptions sur l'invention et la création scientifique.

4

POINCARÉ ET L'INVENTION DES FONCTIONS FUCHSIENNES

Il n'est pas si fréquent que les scientifiques, même quand ils se préoccupent de la signification des idées produites par leur pensée, dans leur travail de recherche, se retournent pour retrouver le processus de l'invention et le moment créateur dont ils ont fait l'expérience, et tenter de le décrire ou d'en rendre compte. Ils préfèrent souvent expliquer ce qu'ils ont découvert en le réorganisant d'une autre manière, qui leur paraît plus justifiée rationnellement. «A la marche réelle de leur

³³ Lakatos [1978].

³⁴ Les ouvrages plus récents qui prennent en compte le rôle de l'imagination dans la recherche scientifique mettent en relief son aspect psychologique, mais laissent dans l'ombre sa fonction pour la rationalité, sinon pour renvoyer à une dimension « esthétique » qui reste vague : voir notamment Holton [1978], Miller [1984].

pensée et de leurs expériences, ils en substituent une autre qui, après coup, leur semble plus logique, plus aisée”, remarquait le physicien Edmond Bouty, concluant, plutôt pour s'en féliciter : “Ils font déjà œuvre d'enseignement”³⁵. Ce qui compte, aux yeux de la plupart, c'est l'édifice ultérieurement remanié qui résulte des œuvres provisoires.

Poincaré, qui affirmait par ailleurs que le centre de sa philosophie de la connaissance était le thème de l'invention scientifique³⁶, ne s'adonna lui-même que rarement à l'exercice de tenter de retrouver la genèse de ses idées. Il le fit du moins à propos de l'une de ses découvertes majeures en mathématiques, celle des fonctions fuchsiennes, et la description qu'il en a donnée est demeurée célèbre. Il la présenta, il est vrai, lors d'une conférence à la Société de Psychologie de Paris -la psychologie, ainsi d'ailleurs que la sociologie, étaient alors sur le devant de la scène, sciences humaines jeunes et prometteuses, et non encore détachées de la philosophie. C'était déjà, au fond, de la philosophie et de la psychologie cognitives...

Poincaré s'efforça donc, sous le titre “L'invention mathématique”, d'analyser ce que fut la suite de pensées qui l'avait amené à imaginer ces nouveaux êtres mathématiques³⁷. Bien que psychologique pour une part, cette description n'est pas étrangère à la recherche rationnelle d'une approche philosophique. Nous tenterons, à partir de ce récit, de suivre à la trace la rationalité dans l'invention, ou la création, scientifique, en l'éclairant ensuite par les conceptions épistémologiques que Poincaré a exposées par ailleurs.

Le récit de Poincaré donne à voir une série de plusieurs phases d'un travail mental d'abord conscient, puis inconscient, puis à nouveau conscient, et encore inconscient, etc. Relevons d'emblée que, même dans les moments de travail inconscient de l'esprit, ce travail est préparé par une activité rationnelle antérieure.

Le processus prend son point de départ dans un problème que Poincaré s'était initialement posé, à partir de la lecture des travaux de Lazarus Fuchs, que lui avait suggérée son professeur Charles Hermite, ainsi que dans la question mise au concours en 1878 par l'Académie des Sciences de Paris sur la théorie des équations différentielles linéaires à une variable³⁸. Poincaré pensa dans un premier temps qu'une certaine classe de fonctions, solutions d'équations différentielles linéaires, ne pouvait exister : cette formulation du problème détermina le premier moment d'un travail volontaire et conscient, mais qui ne semblait pas aboutir : “Depuis quinze jours, je m'efforçais de démontrer qu'il ne pouvait exister aucune fonction analogue à ce que j'ai appelé depuis les fonctions fuchsiennes. (...) J'essayais un grand nombre de combinaisons et je n'arrivais à aucun résultat”³⁹.

Après cette phase de travail conscient et de réflexion intense, une autre se présenta, correspondant à un état de “conscience subliminale”, selon ses propres termes, par une nuit d'insomnie consécutive à l'absorption de café noir... La

³⁵ Bouty [1920], p. 56.

³⁶ Poincaré [1913b].

³⁷ Poincaré [1908c], in [1908a] éd. 1918, p. 43-63, en part. p. 50-63 ; voir Hadamard [1945], p. 22-23.

³⁸ Sur les travaux de Poincaré correspondants, voir Poincaré [1880a et b], [1916-1965], vol. 2 ; [1997], ainsi que sa correspondance avec L. Fuchs, dans Poincaré [1916-1965], vol. 11.

³⁹ Poincaré [1908c], *ibid.*, p. 50.

description se fait alors psychologique, mais sans cesser pour autant de renvoyer au mouvement de la pensée en général : celle-ci s'occupait de choisir des combinaisons d'idées, et finit par mettre en évidence "l'existence d'une classe de fonctions fuchsiennes, celles qui dérivent de la série géométrique". Poincaré les étendit ensuite à d'autres classes de fonctions qui forment ce qu'on appelle aujourd'hui les "fonctions automorphes".

Pendant la phase de l'"état non conscient" de sa pensée, Poincaré indique avoir fait l'expérience d'une sorte de *dédoublement*, comme si son *moi* conscient mais inactif observait son *moi* inconscient (chose rare, au dire de Jacques Hadamard, qui commenta ultérieurement ce témoignage exceptionnel⁴⁰). Il voyait ainsi son propre *moi* être le siège d'une activité vive et désordonnée, les idées (dont la nature n'est pas précisée dans le récit) surgissant en foule et se télescopant. "Je les sentais comme se heurter", raconte-t-il, "jusqu'à ce que deux d'entre elles s'accrochassent, pour ainsi dire, pour former une combinaison stable"⁴¹. Au matin suivant, il avait établi l'existence des fonctions fuchsiennes dérivant de la série hypergéométrique, qu'il décrirait par la suite de la manière suivante : "La fonction fuchsienne est à la géométrie de Lobatchewski ce que la fonction doublement périodique est à celle d'Euclide"⁴². Une seconde phase, longue, de travail conscient, le mena ensuite à la découverte d'une autre classe de fonctions transcendantes, les séries et fonctions thetafuchsiennes, en généralisant une propriété remarquable des fonctions elliptiques.

Cette période fut suivie à nouveau d'une expérience de découverte immédiate et fortuite, en liaison à un travail inconscient. Au cours d'une excursion géologique où il pensait à tout autre chose, venu de Caen à Coutances, en montant sur le marche-pied d'un omnibus, raconta-t-il, "l'idée me vint, sans que rien dans mes pensées antérieures parût m'y avoir préparé, que les transformations dont j'avais fait usage pour définir les fonctions fuchsiennes étaient identiques à celles de la géométrie non euclidienne"⁴³. Ce fut une certitude immédiate, que ne troubla pas la conversation reprise et qu'il put vérifier ensuite à loisir. Une troisième période de travail soutenu sur un tout autre sujet (d'arithmétique), sans grand résultat, fut encore suivie d'une autre illumination soudaine, avec la certitude "que les transformations arithmétiques des formes quadratiques ternaires indéfinies étaient identiques à celles de la géométrie non euclidienne". Il en conçut une généralisation des fonctions fuchsiennes au-delà de la série hypergéométrique. Une dernière difficulté l'arrêta, qui fut levée au cours d'un processus inconscient de même nature que les précédents⁴⁴.

Tel qu'il est décrit, le travail de la pensée dans les phases « inconscientes mi-conscientes » reste assez obscur, ce qui à vrai dire n'a rien pour étonner. Les "idées qui s'accrochent" sont des propositions nouvelles, sans équivalent antérieur : elles prennent ici plutôt, comme dans d'autres récits et analyses d'expériences de compréhension ou de création⁴⁵, la forme de symboles

⁴⁰ Hadamard [1945].

⁴¹ Poincaré [1908c], *ibid.*, p. 62-63.

⁴² Poincaré [1890b].

⁴³ Poincaré [1908c], *ibid.*, p. 51-52.

⁴⁴ Poincaré [1908c], *ibid.*, p. 51-52.

⁴⁵ Voir, en part., Hadamard [1945], et Jakobson *in* Hadamard [1945], p. 93.

ou de signes, dirait plus tard pour sa part Albert Einstein, images mentales abstraites servant d'éléments à la pensée qui joue à les combiner, son jeu visant "à être analogue à certaines connexions logiques que l'on recherche" (entre les concepts que les signes représentent)⁴⁶.

Arrêtons ici ce rappel du récit de Poincaré. Les nouvelles fonctions transcendentes, «automorphes», fournissaient des solutions de nombreuses équations différentielles linéaires algébriques, c'est-à-dire à coefficients rationnels. La construction de ces fonctions fut faite par extension de propriétés des fonctions obtenues à partir des propriétés des équations correspondantes, de respecter certains groupes de transformations.

Il nous faut maintenant compléter ce récit d'une «invention mathématique» par l'examen des analyses épistémologiques que Poincaré a données par ailleurs des propositions des mathématiques (et aussi de la physique), qui éclairent plus profondément ces «chemins de rationalité» dans la création scientifique que nous recherchons. Mais, auparavant, nous nous attacherons à une autre expérience d'«invention», en physique cette fois, en suivant la démarche par laquelle Einstein fut amené à établir la théorie de la relativité, et nous l'étudierons ultérieurement aussi de ses analyses épistémologiques. En croisant ainsi les fils de ce «parallèle», nous ferons mieux saisir la parenté de ces expériences intellectuelles et des conceptions correspondantes sur les éléments d'actes de «création rationnelle».

5

EINSTEIN ET L'INVENTION DES THEORIES DE LA RELATIVITE

Einstein formula sa théorie de la relativité en deux temps, qui correspondent à deux formes, la théorie de la relativité restreinte, obtenue en 1905 (mais « ruminée » pendant près de dix ans), et la théorie de la relativité générale, dont la première idée lui vint en 1907, exprimée dans sa forme achevée en 1915⁴⁷. Ces deux étapes de sa théorie, qui correspondent en fait à deux théories distinctes, même si la seconde peut être vue comme un prolongement ou une radicalisation de la première, constituent des *inventions scientifiques* au sens propre. Nous ne prétendons pas ici les analyser complètement en tant que telles et rendre compte du processus de leur genèse dans toute sa complexité : la tâche serait difficile, et même impossible, si on la voulait exhaustive, et les aspects psychologiques, en particulier, nous demeureront inaccessibles. Nous nous limiterons à y rechercher des éléments significatifs de la rationalité propre de ce travail de la pensée, et du «saut logique» que constitue la création scientifique.

⁴⁶ Einstein [1945].

⁴⁷ Les textes fondateurs de ces théories ont été republiés dans l'édition critique des Oeuvres complètes d'Einstein actuellement en cours : Einstein [1987-1998], vols. 2, 3, 7. Pour une traduction en français des textes principaux, voir Einstein [1989-1993], vols. 2, 3. On consultera aussi la correspondance, répartie dans plusieurs volumes de ces éditions.

La création, fût-ce dans le domaine scientifique, transcende la rationalité linéaire aussi bien que la logique et, même des seuls points de vue philosophique ou épistémologique, l'on ne peut s'en tenir à celles-ci telles qu'on pourrait les reconstituer après coup -avec tous les sédiments d'interprétations et de remaniements théoriques. L'enjeu du travail d'Einstein dans les deux cas était, tout comme les problèmes qu'il étudiait, de nature rationnelle, comme le fut aussi sa réponse particulière (et il en va de même, en général, dans les inventions scientifiques des autres chercheurs). Toute la question est de savoir si le chemin de la création qui va de la formulation du problème à sa solution est lui aussi, et jusqu'à quel point, de cette nature, et s'il est possible de suivre le fil de cette rationalité.

Concernant la genèse de la théorie de la relativité restreinte, dont nous savons qu'elle a été élaborée à partir de difficultés de la théorie électromagnétique, même si sa portée a dépassé ensuite cette seule théorie, Einstein a donné lui-même, à diverses occasions, des indications précieuses, non exhaustives mais cohérentes entre elles. Dans ses «Notes autobiographiques» rédigées en 1946, il indique comment “à l'époque où [il était] étudiant, le sujet qui [le] fascinait le plus était sans conteste la théorie de Maxwell”⁴⁸. Dès sa seconde année au *Polytechnicum* de Zurich, il “rencontr[a] le problème de la lumière, de l'éther et du mouvement de la Terre”, problème qui ne le quitta plus. Nous savons en outre, par une autre réminiscence, plus ancienne et de diffusion limitée (une conférence prononcée en 1922, à Kyoto au cours de son voyage au Japon, publiée seulement assez récemment en anglais), comment lui était venue l'idée de la théorie de la relativité. “C'est il y a dix-sept ans environ”, déclara-t-il donc en 1922, “que l'idée d'essayer de développer le principe de relativité m'est venue à l'esprit”⁴⁹. Cette idée prenait “son origine dans le problème de l'optique des corps en mouvement”. Il s'agissait du problème de l'éther et de la possibilité de mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à ce dernier.

Nous disposons en outre de quelques -rares- témoignages contemporains directs, par des lettres à des amis conservées ou retrouvées, qui confirment cette préoccupation : on peut suivre par cette correspondance, dès septembre 1899 à Mileva Maric, sa future femme, puis en 1901 à Marcel Grossmann, son condisciple, ensuite à Michele Besso, l'ami du *Bureau des brevets*, l'intérêt constant d'Einstein pour les problèmes qui le conduisirent à la théorie de la relativité restreinte de 1905⁵⁰. Faisant plus tard allusion à cette période, il soulignerait sa conviction d'alors que, face aux problèmes de l'électrodynamique, “seule la découverte d'un *principe formel* pour le mouvement”, à l'exemple de la thermodynamique, permettrait de conduire “à des résultats assurés”⁵¹.

Nous savons même qu'un phénomène physique précis occupa une place stratégique dans sa réflexion et le cheminement de ses idées : “Le phénomène de l'*induction électromagnétique* me poussait à formuler le postulat du principe de

⁴⁸ Einstein [1946], p. 32. Elle devait son caractère révolutionnaire, commente-t-il, à ce qu'elle faisait passer de l'idée d'action à distance à celle de champ.

⁴⁹ Einstein [1922].

⁵⁰ Einstein [1987-1998], vol. 1, Einstein & Besso [1979]. Cf. Paty [1993a], chap. 2.

⁵¹ Einstein [1946]. Souligné par moi, M. P.

relativité (restreinte)»⁵². L'importance de ce phénomène dans sa pensée est confirmée par d'autres textes⁵³ : il constitue une sorte d'archétype du rapport des phénomènes électromagnétiques à la relativité des mouvements. En substance, le champ magnétique et le champ électrique exercent l'un sur l'autre, quand l'un d'entre eux est en mouvement par rapport à l'autre, une action réciproque dont l'effet net est le même, quelque soit celui des deux que l'on mette en mouvement, l'autre étant au repos. Et cependant, remarquait Einstein, la théorie électromagnétique alors disponible - celle de Maxwell et Lorentz - expliquait l'apparition d'un courant dans le circuit électrique fermé par deux processus différents suivant chacun des cas : l'éther en repos absolu, lieu et support supposé de ces champs, introduisait de fait une dissymétrie dans la nature des phénomènes (induction magnétique dans un cas, force électromotrice dans l'autre).

«L'idée que deux cas essentiellement différents fussent en jeu, écrit Einstein, m'était insupportable»⁵⁴ : ce ne pouvait être qu'une différence de points de vue, non une différence réelle. Or la théorie portait, à ses yeux, sur les *phénomènes physiques réels*, et devait s'abstraire d'un point de vue particulier sur eux. Sa formulation du problème théorique était ainsi orientée par un programme d'*objectivité* qui, en un sens, *surdéterminait* sa pensée physique par rapport à une simple préoccupation pour des données empiriques et des équations (c'est-à-dire à ce qu'on appelle souvent aujourd'hui une *modélisation*). Mais elle ne cessait pas, pour autant, d'appartenir au champ de la rationalité. La confrontation de l'exigence méta-théorique (qui, en fait, entrait dans sa conception même de la théorie) à l'état de choses rencontré lui faisait ainsi expliciter deux idées théoriques corrélatives l'une de l'autre, et poser leur caractère fondamental : celle d'un principe de *relativité* étendu de la mécanique à l'électromagnétisme, et celle d'*invariance* des lois dans les mouvements relatifs. On ne voit jusqu'ici qu'une ligne de raisonnement suivie consciemment, et posant les conditions d'une formulation particulière - originale- des *difficultés* de la théorie électromagnétique⁵⁵ : à savoir, en définitive, une confrontation entre deux propositions physiques de portée théorique prises pour principes : le *principe de relativité* et celui de *constance de la vitesse de la lumière* (expression, pour Einstein, de ce que la théorie électromagnétique de Maxwell a de plus fondamental).

De la confrontation des deux propositions surgit la solution, qui consista à réformer l'espace et le temps. Le fil d'une rationalité directe ne semble plus suffisant, ici, pour guider seule le mouvement de la pensée : la *difficulté* était en fait un réel *obstacle*, qui demandait, pour aller de l'avant, un véritable saut conceptuel. Einstein ne nous en a pas dit plus, et lui-même n'aurait sans doute pas su reproduire exactement la suite de réflexions qui accompagna la prise de conscience de la difficulté. Nous ne connaissons que le moment de la sortie : *l'espace et le temps*, qui servent à exprimer les phénomènes physiques et les mouvements des corps, devaient être conçus comme des *grandeurs* pleinement

⁵² Einstein [1946]. Souligné par moi, M. P.

⁵³ En particulier le manuscrit Einstein [1920]. Pour une analyse sous ce rapport, voir Paty [1993a], chapitres 2 et 3.

⁵⁴ Einstein [1946].

⁵⁵ Sur ce que recouvre, épistémologiquement, la formulation d'une «difficulté» (et non, par exemple, d'une «anomalie»), voir Paty [1993a, 1996b].

physiques, donc *soumises elles-mêmes aux deux principes*, ce qui devait amener à modifier leur définition.

Comment la réflexion d'Einstein est-elle passée de l'énoncé de la difficulté à cette solution, qui correspond, en fait, à un renversement du problème ? Cessant de considérer les deux principes comme inconciliables (la vitesse de la lumière, étant celle d'un ébranlement de l'éther, ne pouvait être la même dans tous les repères d'inertie, ce qui était contraire au principe de relativité), il les admettait pour fondamentaux et reconstruisait sur eux toute la physique. Ou plutôt, toute la théorie du mouvement en tant que telle, c'est-à-dire toute la cinématique, et les modifications de la physique proprement dite (car ce n'était pas vraiment dès lors une reconstruction, mais un ajustement), s'ensuivaient.

C'est que les deux principes inconciliables n'étaient pas seuls, mais constituaient un complexe conceptuel avec les propriétés qui les accompagnaient. L'obstacle posé à la pensée peut, en fait, être vu comme un noeud de concepts imbriqués, dont rien ne permettait à première vue d'identifier ceux des fils qui permettraient de dénouer la pelote serrée. Seule une sorte de saisie synthétique immédiate, plus intuitive qu'analytique, fit voir, soudainement, après plusieurs semaines d'efforts infructueux, la voie de la sortie, les brins à tirer.

Parmi les propriétés qui sous-tendaient les deux principes, l'une se détacha au regard, proposition implicite qui se tenait entre eux. Einstein l'indique dans ses rétrospectives : c'était la règle d'addition galiléenne des vitesses. Dès lors, ce n'étaient pas deux, mais trois propositions qui, prises ensemble, étaient inconciliables. Tel fut le fil qui permit le dénouement : si l'on supprimait la règle des vitesses, les deux principes pouvaient être conciliés, moyennant une autre règle de composition à trouver. Il fallait alors avoir l'idée du renversement de perspective théorique souligné plus haut, et penser à l'espace et au temps comme grandeurs physiques, contre leurs définitions absolues admises depuis Newton. C'est ici tout un réseau de réflexions, incluant la critique des concepts physiques (et l'influence, entre autres, des analyses de Mach), qui doit avoir tenu un rôle, par un appel synthétique de l'intuition. La place tenue, dans le travail théorique sur ces grandeurs, après le passage de l'obstacle, par la question de la simultanéité et la critique de son caractère absolu, liée d'ailleurs à la prise de conscience de l'impossibilité d'actions instantanées à distance, est révélatrice de la complexité de ces notions prises ensemble.

Nous pouvons identifier avec assez de précision ce que fut, chez Einstein, le moment de l'*invention* de sa solution (solution de la difficulté identifiée), qui détermine sa *découverte* de la théorie de la relativité. Cette dernière comporte, à partir de la mise en place des relations entre les concepts physiques, et d'abord entre les espaces et les temps, une part de *déduction* (les équations de transformation qui font passer d'un référentiel d'inertie à un autre), après le moment d'*intuition synthétique* qui a ouvert la voie, et la *reconstruction* des grandeurs en suivant cette voie désormais balisée.

Et où se situe l'*acte* proprement *créateur* ? On voit bien qu'il caractérise *tout le mouvement de la pensée*, depuis le but même qu'elle s'est fixée, par le choix de ses raisons propres, à travers une *formulation des problèmes* conditionnée par une certaine exigence d'*intelligibilité*, puis l'*identification des difficultés* à surmonter, ensuite la formulation du *principe d'une solution*, et jusqu'aux modalités du travail plus ordinaire (en ce qu'il est essentiellement démonstratif et

déductif) de l'*établissement des relations* de grandeurs qui sont le corps de la théorie. Ce travail de création fait usage du raisonnement (celui-ci n'est pas déduction seule, il est constructif en constituant des objets) aussi bien que de l'*intuition*, terme par lequel nous désignons ici une perception (intellectuelle) *synthétique* d'un complexe de concepts. Ajoutons que le *raisonnement*, plus explicite, et l'*intuition*, conçue dans ce sens, ne sont pas deux modes de pensée en opposition car, dans le choix de ses chemins, le raisonnement est souvent guidé par l'intuition (il l'est à l'évidence dans le cas ici étudié).

On peut suivre de manière semblable la genèse, dans la pensée d'Einstein, de la théorie de la relativité générale comme extension du principe de relativité, et généralisation de la théorie de la relativité restreinte, aux mouvements quelconques. La constitution de cette théorie comporte, elle aussi, plusieurs phases, que l'on peut retracer plus aisément que dans le cas précédent. Chacune fut ponctuée par des publications importantes, et les réflexions et remarques de l'auteur accompagnant sa démarche ou rétrospectives, en bien plus grand nombre, éclairent sur certains aspects caractéristiques de son travail, en particulier sur ses intentions programmatiques.

Mais cela ne signifie pas pour autant, là non plus, qu'une reconstitution complète soit possible. Si un fil de rationalité claire court au long du travail d'élaboration de cette théorie d'un genre nouveau (une théorie des invariances conduisant à une sorte de géométrie de la gravitation), il se perd à plusieurs reprises dans des nœuds complexes que seules une intuition de génie et l'acquisition d'une habileté dans le maniement du formalisme mathématique pouvaient résoudre. La création, ici plus peut-être qu'ailleurs, se rend manifeste, et Einstein en eut pleinement conscience.

La conscience de ce saut explicite de la pensée créatrice pour édifier de toutes pièces (ou quasiment) une théorie physique qui paraissait alors radicalement neuve fut fondamentale sur sa pensée physique et épistémologique. Elle radicalisa sa conception de la nature du travail théorique et réorienta en partie sa manière d'aborder les problèmes physiques, en modifiant sa conception du rôle des mathématiques. Celui-ci exprimait désormais mieux que tout, à ses yeux, le saut créateur nécessaire dans la représentation théorique du réel physique. "C'est dans la mathématique que réside le principe créateur", ne craignit-il pas d'écrire à ce propos⁵⁶. Cependant cette phase, sur le sens de laquelle il ne faut pas se méprendre (le travail mathématique permet de réaliser une demande *physique*⁵⁷), fut précédée par d'autres, où l'intelligence créatrice portait encore, plus classiquement, comme la précédente, sur une pensée des phénomènes, de leurs principes et concepts.

A l'origine de la théorie de la relativité générale se tiennent deux considérations de nature conceptuelle, toutes deux liées à une critique de l'*inertie*, propriété fondamentale des corps matériels et de leur mouvement. La première portait sur la nature des *référentiels d'inertie*, animés de mouvements rectilignes et uniformes les uns par rapport aux autres, auxquels seuls s'appliquait le principe de relativité de la première théorie (*relativité restreinte* aux mouvements d'inertie). Le choix de ce type de mouvement est arbitraire, remarquait Einstein, puisque c'est nous qui choisissons les mouvements d'inertie parmi tous ceux qui existent dans la

⁵⁶ Einstein [1933].

⁵⁷ Voir Paty [1993a], chapitre 5.

nature. L'on retrouve ici l'exigence d'*objectivité* pour les théories ; à cette différence près avec la précédente (l'induction électromagnétique pour la relativité restreinte) qu'aucune évidence donnée par des phénomènes ne venait l'étayer. Elle n'en correspondait pas moins, pour Einstein, à une exigence fondamentale, *philosophique*, sur la nature et sa représentation. Il s'ensuivait la nécessité d'étendre le principe de relativité aux mouvements quelconques, dépassant le 'privilège' accordé aux seuls mouvements inertiels.

L'autre considération, formulée en même temps que la première, portait sur le concept de *masse d'inertie*, qui caractérise en fait, comme la relativité restreinte l'établissait, non seulement les corps mais les échanges d'énergie : en dépit du lien qu'elle établit entre l'énergie et l'inertie, la théorie de la relativité restreinte restait muette sur le rapport de l'inertie et du poids. L'effet de ce questionnement fut l'érection en principe de l'égalité de la masse d'inertie et de la masse gravitationnelle (« principe d'équivalence »).

Dans la genèse des idées d'Einstein, cette seconde raison semble avoir été celle qui suscita d'abord sa réflexion, lui faisant prendre conscience du caractère impératif de la première (tous les phénomènes pouvaient être traités dans le cadre de la relativité restreinte, sauf la gravitation, à cause de son lien aux mouvements accélérés). Elle se traduisit pour lui dans une « expérience de pensée » (« *Gedankenexperiment* »), qu'il qualifia lui-même plus tard "la pensée la plus heureuse de [sa] vie", résumée dans la phrase: "Si quelqu'un tombe dans un mouvement de chute libre, il ne sent plus son propre poids"⁵⁸. Cela revenait à transcrire l'égalité (l'identité) de la masse inertielle et de la masse gravitationnelle en une équivalence entre un champ de pesanteur, ou de gravitation, homogène, et un mouvement uniformément accéléré. Einstein se rendit ainsi compte qu'il ne s'agissait pas tant d'incorporer le champ de gravitation à la théorie de la relativité (restreinte) que de l'utiliser comme un moyen de dépasser la covariance privilégiée pour les mouvements d'inertie en la généralisant à tous les types de mouvements. De cette généralisation, il espérait qu'elle lui "fournirait du même coup la solution du problème de la gravitation"⁵⁹. L'essence de la théorie de la relativité générale se trouvait donc dans cette pensée, et l'article de 1907 esquissait, en conclusion de l'exposé de la théorie de la relativité restreinte, le programme de sa recherche dans cette direction.

Il est possible de suivre presque pas à pas ses efforts pour accomplir ce projet jusqu'à l'instauration de la théorie de la relativité générale à la fin de l'année 1915⁶⁰. Ne mentionnons ici, sans pouvoir le détailler, que le premier « moment mathématique » de l'invention, qui se situe en 1912 : Einstein se rendit compte de l'insuffisance de l'espace euclidien, et de la nécessité d'une formalisation mathématique du problème de la covariance générale sur le mode de l'espace-temps (relativiste) de Minkowski, élargi à l'aide du calcul tensoriel absolu de Ricci et Levi-Civita⁶¹. C'est alors qu'il lui fallut « créer par les mathématiques »⁶², aboutissant

⁵⁸ Einstein [1922, 1946]. Cette pensée lui vint en novembre 1907, selon Abraham Pais (Pais [1982], p. 178).

⁵⁹ Einstein [1946].

⁶⁰ Voir Pais [1981], et la collection des *Einstein Studies*, publiée par Don Howard et John Stachel (en part., Howard & Stachel [1989], Eisenstaedt & Kox [1992]).

⁶¹ Voir Paty [1993a], chapitre 5.

aux équations donnant la métrique non-euclidienne en tout point de l'espace-temps en fonction du champ de gravitation en ce point.

6

INDUCTION NATURELLE OU LIBRE CREATION ? LE ROLE DE L'INTUITION

On peut dire, en un sens, qu'Einstein découvrait, par son expérience avec les géométries non-euclidiennes pour la relativité générale, ce que Poincaré avait exprimé à propos des *analogies mathématiques* et de la *libre invention*⁶³ : mais le lien de ces deux idées n'avait pas, ou alors fort rarement, été pris en considération dans sa nature fondamentale, en tous cas pour ce qui concerne la physique. La conception empiriste d'une induction conçue comme nécessité logique à partir des phénomènes était encore celle de la plupart des physiciens (Pierre Duhem et quelques autres étant de rares exceptions). Poincaré lui-même, qui critiquait l'empirisme autant que l'apriorisme pour les mathématiques, avait à l'égard de la physique une attitude moins radicale, plus empiriste dans sa pratique mais aussi dans ses conceptions⁶⁴. Toutefois la distance qu'il voyait entre le donné de la nature et ses formes théoriques (choisies par convention) lui permettait de reporter sur ces dernières toutes les possibilités de l'invention mathématique. Il raisonnait, par exemple, pour l'électrodynamique relativiste, en termes d'invariants et de groupes de transformation, et fut d'ailleurs le premier à pratiquer cette méthode⁶⁵.

Il nous faut donc, maintenant, revenir aux conceptions épistémologiques et philosophiques de Poincaré et d'Einstein qui sont en rapport aux éléments relevés dans l'évocation de leurs expériences créatrices de formes rationnelles, de connaissances scientifiques.

L'intuition chez Poincaré

Nous ne reprendrons pas, ici, les analyses de Poincaré, à partir de la genèse et de la nature de la géométrie, aussi bien que des principes, généralisés et transmués de propositions factuelles en énoncés normatifs, qu'il concluait par la critique de l'empirisme aussi bien que de l'apriorisme kantien, et par l'affirmation de son conventionalisme⁶⁶. Nous insisterons plutôt sur sa conception de l'*intuition*, notion centrale de sa philosophie de la connaissance.

⁶² Voir plus haut.

⁶³ Voir plus loin.

⁶⁴ Paty [1996a, et en préparation].

⁶⁵ Paty [1996a]. Sur l'empirisme de Poincaré en physique, cf. Paty [en préparation]. Sur les divers sens de la physique mathématique pour Poincaré, cf. Paty [1999].

⁶⁶ Voir, par exemple, Poincaré [1902].

Pour lui, l'intuition est nécessaire à tout travail créateur, dans quelque science que ce soit. Elle se présente, certes, sous des formes bien différentes, qui vont de l'«appel aux sens et à l'imagination», à l'induction à partir des faits, et enfin à l'*induction mathématique* qui se rattache à l'«*intuition du nombre pur*»⁶⁷ (cette dernière est proche des intuitions *a priori* kantienne). Mais elle apporte un complément indispensable à la logique qui, seule, ne suffit pas, ni dans l'enseignement, ni dans le travail de recherche : utile à l'étudiant pour apprendre à aimer les mathématiques, «l'intuition (...) l'est plus encore au savant créateur». Car c'est elle qui fait «voir le but de loin», qui donne la «vue d'ensemble» sans laquelle il n'y aurait pas d'*invention*⁶⁸.

Il nous faut évoquer ici ce que Poincaré appelle les «analogies mathématiques», qui expriment des rapports «vrais», des rapports de structure, dans la profondeur des faits mathématiques ou physiques ; elles justifient et permettent le passage, par une extension créatrice, du particulier au général. Pour ce qui concerne la physique, l'extension des principes permet d'accéder pleinement à la physique théorique et mathématique⁶⁹. Tout l'art du mathématicien ou du physicien est de savoir découvrir «les analogies véritables, profondes, celles que les yeux ne voient pas et que la raison devine», grâce à «l'esprit mathématique, qui dédaigne la matière pour ne s'attacher qu'à la forme pure». L'analogie comprise dans ce sens est inséparable du mouvement de pensée qui échappe à la simple comparaison et à l'induction empiriste, pour «inventer librement».

Dans cette invention, c'est l'*intuition*, pour Poincaré, qui a le rôle principal, aussi bien en mathématiques qu'en physique : «Inventer, c'est discerner, c'est choisir», et c'est l'intuition de l'ordre mathématique qui fait deviner des harmonies et des relations cachées⁷⁰. Mais ce n'est choisir qu'en un certain sens seulement, car les combinaisons stériles ne se présenteront même pas à l'esprit du mathématicien créateur, qui s'en tiendra à construire celles qui sont utiles, en infime minorité par rapport à toutes les combinaisons possibles : nous dirons peut-être plus exactement qu'inventer, c'est voir. Et voir nous ramène à l'intuition, qui doit être objet de formation, d'exercice, pour accéder à un niveau supérieur aux intuitions directement sensibles. Le degré élevé de développement de cette intuition fait la capacité à inventer, à être créateur.

Poincaré se réclamait, parmi les mathématiciens, de l'«esprit d'intuition» par opposition à l'«esprit d'analyse». Dans une mesure importante, pour lui, l'*intuition* s'oppose à la *logique*, et l'on sait qu'il se sentait lui-même plus près de la première⁷¹. La première fonction de l'enseignement des mathématiques était, à ses yeux, de développer cette faculté. Car le géomètre pur doit posséder «l'art de choisir entre toutes les combinaisons possibles» des termes proposés au raisonnement, et cet art est donné dans l'intuition, non dans la logique : «C'est par la logique qu'on

⁶⁷ Poincaré [1900].

⁶⁸ *Ibid.*

⁶⁹ Poincaré [1897], in [1991], p. 22-28. Sur la signification de l'analogie mathématique chez Poincaré, cf. Paty [à paraître, b]. Sur la «physique mathématique» au sens de Poincaré, cf. Paty [1999]. Sur le cas de l'électrodynamique, et de sa transformation par Poincaré en une théorie de la «physique mathématique», cf. Paty [1996a].

⁷⁰ Poincaré [1908c], in [1908a] éd. 1918, p. 47-48.

⁷¹ Poincaré [1889].

démontre, mais c'est par l'intuition qu'on invente". Sans cette dernière, ajoute-t-il, le géomètre serait comme un écrivain qui serait ferré sur la grammaire, mais qui n'aurait pas d'idées". Mais l'intuition s'impose aussi dans la mise en rapport du monde mathématique avec le monde réel, car elle seule peut "combler l'abîme qui sépare le symbole de la réalité".

Cela étant, dans le même texte de 1889, "La logique et l'intuition dans la science mathématique et dans l'enseignement", où il oppose l'esprit d'analyse et l'esprit d'intuition, deux tendances dans ce que nous pourrions appeler le "style" des mathématiciens, Poincaré admet que les mathématiciens qui ont -et prônent- une préférence pour l'esprit d'analyse et le raisonnement logique ont aussi à développer une forme d'intuition. C'est que, pour lui, même en Analyse pure, si "la logique [...] peut seule donner la certitude [et] est l'instrument de la démonstration", c'est encore "l'intuition [qui] est l'instrument de l'invention".

Cette "intuition pure", qui porte sur des formes, se rattache à "l'intuition du nombre pur", par opposition à une intuition plus sensible. C'est elle qui fait sentir à l'analyste le "principe d'unité interne" des entités abstraites sur lesquelles porte sa pensée, selon la fonction de perception synthétique attribuée de manière générale à l'intuition. Evoquant l'exemple du mathématicien Charles Hermite, analyste notoire, Poincaré rappelle la métaphore par laquelle ce dernier caractérisait ce genre d'intuition travaillant sur des entités formelles : "Les entités les plus abstraites étaient pour lui comme des êtres vivants". C'est la saisie immédiate de leur principe d'unité (ce "je ne sais quel principe d'unité interne" senti par le créateur, sans projection en image sensible), qui lui permet de les comprendre et qui fait la capacité d'inventer : elle a, à cet égard, le même rôle de l'intuition plus sensible. Cela étant, Poincaré maintient la différence entre l'"intuition pure" des analystes et l'intuition sensible : elles "n'ont pas le même objet", et renvoient à "deux facultés différentes de notre âme" qui sont comme "deux projecteurs braqués sur deux mondes étrangers l'un à l'autre", et elles correspondent à deux modalités distinctes de l'invention.

Poincaré se situait lui-même dans la seconde, la faculté d'"intuition sensible" qui restait à ses yeux, malgré tout, "l'instrument le plus ordinaire de l'invention" en mathématiques⁷². Les mathématiciens d'"esprit intuitif" dans ce sens s'appuient généralement, dans leur travail d'analyse, sur des images non seulement géométriques mais aussi physiques. Ces dernières peuvent stimuler l'intuition (sensible) mathématique, en l'aidant à deviner la solution avant d'avoir les moyens de la démonstration, à "voir d'un coup d'œil ce que la déduction pure ne lui montrerait que successivement". Les "analogies physiques" permettent de pressentir des vérités mathématiques qui échappent encore à la rigueur du raisonnement comme, par exemple, Félix Klein utilisant des propriétés des courants électriques pour résoudre certaine question relative aux surfaces de Riemann⁷³. La rigueur au sens de l'analyste viendra plus tard : du moins le résultat est-il acquis, et l'on n'en doute pas, sans en avoir encore la certitude mathématique. C'est de cette façon "que se sont faites presque toutes les découvertes importantes".

Einstein et la liberté logique

⁷² Poincaré [1889].

⁷³ Poincaré [1889].

Einstein avait rencontré dans l'épistémologie d'Ernst Mach l'idée du caractère relatif et provisoire des concepts et des théories, dans la philosophie de David Hume la critique de l'induction -libérant la relation entre les phénomènes et les concepts-, et dans celle d'Emmanuel Kant l'idée que la réalité du monde extérieur, posée "devant nous comme une énigme", nous est intelligible, et la nécessité, pour penser, de concepts et de catégories indépendants de l'expérience⁷⁴.

En élaborant sa propre conception du rapport des représentations théoriques aux données d'expérience et aux impressions des sens, il trouva aussi dans les écrits d'Henri Poincaré des éléments de réflexion qui lui permirent d'échapper aux limites de l'apriorisme kantien tout en dépassant ce qui manquait à la critique de Hume : notamment l'idée de libre choix dans le raisonnement. Mais quand Poincaré en faisait la pierre angulaire son conventionalisme, Einstein l'intégrait à une perspective rationaliste, au prix d'une transformation de la solution kantienne. Il estimait que l'on peut "en dire encore bien davantage" que Kant : "que les concepts qui apparaissent dans nos pensées et dans nos expressions linguistiques sont -considérés d'un point de vue logique- de libres créations de la pensée", qu'ils "ne peuvent pas être obtenus par induction à partir de l'expérience des sens"⁷⁵. Car "un gouffre (infranchissable logiquement)" se tient entre "le monde de l'expérience sensorielle [et] celui des concepts et des propositions", qui sont en réalité de libres inventions⁷⁶. Nous n'en avons pas spontanément conscience, à cause de l'habitude acquise de les associer entre eux. C'est cette «liberté logique» qui permet de construire les concepts et les représentations théoriques, selon un choix des règles qui paraissent les plus adéquates.

Cette idée est au cœur des épistémologies de Poincaré et d'Einstein, de leurs conceptions respectives du rapport de la pensée rationnelle et du monde réel, et de leur pensée de la création scientifique.

7

LES PROCESSUS CRÉATIFS DE LA PENSÉE RATIONNELLE

Poincaré

Le travail scientifique consiste en grande part, pour Poincaré, à sélectionner, parmi les faits qui s'offrent en multitude, ceux qui sont les plus riches de signification, ne serait-ce que parce que "le cerveau du savant, qui n'est qu'un coin de l'univers, ne pourra jamais contenir l'univers entier". Voilà donc le physicien ou le mathématicien, dans l'incapacité de simplement reproduire - ce qui, d'ailleurs, serait sans doute insuffisant pour comprendre -, dans la nécessité

⁷⁴ Einstein [1936].

⁷⁵ Einstein [1944].

⁷⁶ *Ibid.* Voir Paty [1993], chap. 9.

d'inventer. S'en tenir à des rapports de ressemblance superficielle entre des faits ne produirait que banalité et répétition, sans procurer l'accès à des relations significatives.

Les similitudes porteuses de sens (ce sont, pour Poincaré, les « analogies mathématiques ») transcendent les dissemblances matérielles ; plus des faits dont le rapprochement s'avère fécond sont distants, plus la propriété qu'ils révèlent s'avèrera essentielle -ce qui correspond aussi à un caractère esthétique⁷⁷. La fécondité du rapprochement des faits, mathématiques ou physiques, se marque en ce qu'ils font apparaître un ordre entre des éléments qui semblaient auparavant sans relation, ou laissés au hasard, et conduisent à la connaissance d'une loi. Former de telles combinaisons fécondes relève du processus de l'"invention mathématique" ; c'est parvenir à ce que Poincaré renvoie souvent à l'"harmonie", qu'il réfère à "la beauté intellectuelle" et à l'"élégance mathématique"⁷⁸.

Ce qu'il appelle harmonie correspond à l'instantanéité de l'évidence pour l'esprit, à laquelle se ramène, en fin de compte, pour lui comme trois siècles et demi avant, pour Descartes⁷⁹, l'intelligibilité. "Plus nous verrons cet ensemble clairement et d'un seul coup d'œil, écrit-il, mieux nous apercevrons ses analogies avec d'autres objets voisins, plus par conséquent nous aurons de chances de deviner les généralisations possibles"⁸⁰. Et un raisonnement "à demi intuitif" permet, en raison de sa brièveté, de voir simultanément ses diverses parties, "de sorte qu'on aperçoit immédiatement ce qu'il y faut changer pour l'adapter à tous les problèmes de même nature qui peuvent se présenter"⁸¹.

Il convient de préciser que l'invocation de l'analogie, fréquente chez Poincaré, concerne essentiellement les jugements postérieurs à l'invention, comme pour en résumer synthétiquement le résultat net. L'analogie n'est que la leçon que l'on en tire, quand les rapprochements se sont fait jour et que leur fécondité s'est manifestée. C'est toujours de l'«analogie mathématique» qu'il est alors question, celle qui indique la structure et l'unité profondes des éléments rapprochés dans la découverte. Dans le travail créatif, où opère la faculté d'intuition (cette intuition qui fait "voir le but de loin", qui donne la "vue d'ensemble" sans laquelle il n'y aurait pas d'invention⁸²), les propriétés à considérer se proposent à l'entendement sous leur forme propre, sur laquelle le raisonnement opère directement.

Dans ce processus c'est, en fait, à l'inconscient que Poincaré renvoie la tâche d'établir les combinaisons d'idées qui sont utiles, par élimination et par choix. Le travail préparatoire d'attention soutenue à un problème déclenche l'activité inconsciente, dont la pensée consciente définit et dirige "plus ou moins" la direction générale. Il se représentait cette activité inconsciente, opérant sur des idées élémentaires à combiner entre elles, en usant d'une métaphore sur les "atomes crochus d'Epicure", lancés en tous sens et se combinant entre eux à notre insu, et seule la combinaison retenue s'offrant ensuite à la pensée consciente.

Pour Poincaré, l'inconscient "sait choisir, il sait deviner". Il se

⁷⁷ Poincaré [1908a], Livre 1, chapitre 1, «Le choix des faits», éd. 1918, p. 11.

⁷⁸ *Ibid.*, p. 15-17.

⁷⁹ Descartes [1628]. Cf. Paty [1997].

⁸⁰ Poincaré [1908b], *in* [1908a], éd. 1918, p. 26.

⁸¹ *Ibid.*

⁸² Poincaré [1897].

demandait même si le “moi subliminal [ne serait pas] supérieur au moi conscient”, comme le philosophe Emile Boutroux en avait examiné l'hypothèse⁸³. Jacques Hadamard devait, pour sa part, contester le sens de cette expression, lui préférant l'idée d'une coopération entre les deux⁸⁴. Poincaré inclinait à considérer que le “moi subliminal” privilégie les phénomènes qui affectent la sensibilité en direction de l'harmonie, de la beauté mathématique, cette sensibilité esthétique correspondant en mathématiques aux solutions qui relèvent de la loi que l'on recherche⁸⁵. Mais le problème de savoir ce que recouvrent exactement les termes qui renvoient à des considérations esthétiques reste entier, à cela près qu'il s'agit, en dernier ressort -en science comme en art- de former ou d'exprimer des significations fortes.

Einstein

Einstein concevait l'expérience de la création scientifique comme une forme particulière de l'expérience plus générale de la *pensée*. L'acte de ‘penser’ met en jeu, estimait-il, au-delà des images résultant des impressions des sens, les concepts, “toute notre pensée [étant] un libre jeu avec des concepts”⁸⁶. Et cependant, une fois la pensée de l'individu formée grâce à l'apprentissage et à l'usage social des mots⁸⁷, il jugeait, par sa propre expérience, que la pensée même conceptuelle “se déroule pour une grande part sans faire usage de signes (de mots)”. Il jugeait aussi, rejoignant ce que disait Poincaré de l'invention scientifique, qu'elle s'effectue “même, à un degré élevé, de manière inconsciente”⁸⁸.

Il rattachait aussi la pensée scientifique, qu'il s'agisse de sa formation chez l'individu ou de création, à l'expérience de l'étonnement, telle qu'il raconte l'avoir éprouvée dans son enfance, à l'âge de quatre ou cinq ans, en voyant tourner l'aiguille d'une boussole ; ou encore, plus tard, à découvrir dans un livre les démonstrations de la géométrie d'Euclide⁸⁹. Le philosophe Baruch Spinoza, près de trois siècles auparavant, faisait semblablement l'expérience de l'illumination de son intelligence à propos de la moyenne proportionnelle⁹⁰.

L'expérience de la connaissance, pour Einstein, était en même temps celle de l'acquisition de l'intuition⁹¹: l'intuition physique pour ce qui le concernait, qui constituait ce qu'il appelait encore son ‘instinct scientifique’, qu'il évoquait fréquemment à propos du sens de tel concept, ou aussi bien à propos des débats sur la direction que devrait prendre, à ses yeux, la théorie physique. Cette intuition, à laquelle il demandait, dès ses années d'étudiant, de “distinguer clairement ce qui est important du point de vue fondamental, et dont les bases sont assurées, du reste de l'érudition plus ou moins superflue”, opère dans la rationalité, au stade de

⁸³ Boutroux, cité par Hadamard [1945]. Emile Boutroux était par ailleurs le beau-frère de Poincaré, et ami de William James.

⁸⁴ Hadamard [1945].

⁸⁵ Poincaré [1908c], p. 53-59.

⁸⁶ Einstein [1946], p. 6-7.

⁸⁷ Einstein [1941].

⁸⁸ Einstein [1946], p. 6-7.

⁸⁹ *Ibid.*, p. 8-11.

⁹⁰ Voir son *Court Traité* (Spinoza [1656]). Cf. Paty [1986], p. 294.

⁹¹ En allemand, “Einführung”. Einstein [1946c], p. 14-15.

l'invention aussi bien qu'à celui de l'évaluation et de la critique (par exemple, sur la physique quantique)⁹². Dans tous les cas, avant l'analyse vient le stade de l'*invention* proprement dite, où l'*intuition* tient le rôle principal.

Travailler sur des idées, c'est toujours, pour Einstein, travailler dans la rationalité. On ne peut cependant donner de l'intuition, et de l'invention où elle joue un si grand rôle, de description normative : elle relève de l'expérience singulière, et se rattache à l'activité mentale en général. Elle est une vue immédiate, dont on peut ensuite reconstituer logiquement les raisons, mais qui repose sur les expériences antérieures de la pensée, et les processus mentaux relatifs de l'attention à un problème suivent généralement un chemin indirect⁹³. Son expérience, évoquée plus haut, montre que l'important, à cet égard, est de s'être imprégné de la considération du problème, de l'avoir tourné et retourné jusqu'à lui trouver une formulation rationnelle qui porte en elle la virtualité de la solution.

Car la pensée est guidée par une certaine manière de disposer ses éléments d'informations : parvenir à la solution d'un problème, c'est se former une image claire au bout du processus, choisissant parmi les éléments en se laissant guider par l'intuition. Il en va pour les concepts, qui font la pensée, et à partir desquels l'on se forme une représentation intelligible du monde, comme pour les mots du langage : ces signes sont reliés aux impressions sensibles par des règles, selon une correspondance relativement stable⁹⁴. En science, le système de concepts visant à une représentation des expériences des sens est, "pour ce qui concerne la logique", "un libre jeu avec des symboles selon des règles du jeu données arbitrairement (quant à la logique)". Et il en va, d'ailleurs, de même dans la «pensée de tous les jours»⁹⁵.

L'expérience de la pensée des concepts, en particulier la pensée scientifique, fait intervenir une pensée en même temps consciente et mi-consciente, pour laquelle le concept fonctionne comme un signe particulier, sans s'identifier à un mot. "Il n'est pas nécessaire", indique Einstein, "qu'un concept soit relié à un signe (un mot) perceptible par les sens et reproductible ; mais lorsque c'est le cas, la pensée devient par là communicable". Pour lui la "pensée se déroule pour un grande part sans faire usage de signes (de mots), et même, à un degré élevé, de manière inconsciente"⁹⁶.

Analysant son propre cas, il indiquait, en répondant à son questionnaire de Jacques Hadamard sur «la psychologie de l'invention dans le domaine mathématique»⁹⁷, que "les mots et le langage, écrits ou parlés ne semblent pas jouer le moindre rôle dans le mécanisme de ma pensée"⁹⁸. Il donnait, sur le fonctionnement de sa pensée, les précisions suivantes : "Les entités psychiques qui

⁹² Paty [1994, à paraître].

⁹³ Voir, pour des indications détaillées, Paty [1993], p. 383.

⁹⁴ Einstein [1936, 1941].

⁹⁵ Einstein [1944]. Voir la remarque faite antérieurement dans le même sens par Helmholtz, dans un texte de 1894 sur "L'origine et l'interprétation correcte des impressions de nos sens" : "Les images mémorisées des impressions des sens peuvent devenir des éléments de combinaison des idées, même si ces impressions ne peuvent être décrites par des mots, et donc conceptualisées" (voir Helmholtz [1971]).

⁹⁶ Einstein [1946].

⁹⁷ Hadamard [1945].

⁹⁸ Einstein [1945].

servent d'éléments à la pensée sont certains signes ou des images plus ou moins claires, qui peuvent «à volonté» être reproduits et combinés”, et qui sont en relation avec les concepts logiques du problème posé. L'activité mentale, le “jeu assez vague” sur ces éléments ou signes (qui, dans son cas, sont “de type visuel et parfois moteur”), est sous-tendue émotionnellement par “le désir de parvenir finalement à des concepts logiquement liés”, et le jeu sur les éléments en question “vise à être analogue à certaines connexions logiques que l'on recherche”. Ce n'est qu'à un stade secondaire, quand les associations trouvées entre les éléments sont suffisamment stables et peuvent être reproduites à volonté, qu'on recherche alors “avec peine les mots ou autres signes conventionnels” qui expriment la solution dans les termes du problème⁹⁹.

Le linguiste Roman Jakobson a souligné la concordance entre la description qu'Einstein donne du genre de signes qui entrent dans le processus de pensée, et celle qu'il pouvait lui-même proposer, à savoir que “les signes sont un soutien nécessaire de la pensée”, et que “la pensée intérieure, surtout quand elle est créatrice, use volontiers d'autres systèmes de signes [que ceux du langage], qui sont plus souples, moins standardisés que le langage et qui laissent davantage de liberté, de dynamisme à la pensée créatrice”¹⁰⁰.

8

CONCLUSION

Le thème de la création scientifique, tel que nous l'avons rencontré à travers l'expérience vécue de savants qui étaient aussi philosophes comme Poincaré et Einstein, apparaît ainsi lié, d'une part, à des processus de pensée dont la rationalité, même si elle n'est pas totale, reste essentielle et que l'on peut saisir en diverses séquences, entre une mise en problème initiale et l'obtention de résultats et, d'autre part, à des problèmes épistémologiques fondamentaux sur la constitution et la nature de la connaissance scientifique. C'est donc bien que ce thème appartient de droit au domaine de l'investigation philosophique et qu'on ne peut se contenter de le renvoyer à la psychologie ou à l'établissement de consensus sociaux cristallisés en «paradigmes».

Sur le premier aspect, même dans les moments où le fil d'un raisonnement ne se laisse pas voir, et qu'il se perd dans des noeuds complexes que la pensée semble franchir par des sauts, il semble que l'activité inconsciente de l'esprit soit dirigée par une attention, un effort, une volonté. Poincaré renvoyait à l'inconscient la tâche d'établir les combinaisons d'idées qui sont utiles, par élimination et par choix¹⁰¹.

Reprenant la comparaison faite par Poincaré entre les idées élémentaires et les atomes jetés au hasard, Hadamard imaginait l'esprit, dans sa première

⁹⁹ Einstein [1945].

¹⁰⁰ Jakobson [1980].

¹⁰¹ Poincaré [1908c], *in* [1908a] éd. 1918.

réflexion sur un problème, agitant des éléments d'idées, et ces derniers, dans la période inconsciente, continuant leur parcours de manière désordonnée : “Ce désordre peut avoir une haute valeur parce que les rares rencontres qui sont utiles, étant d'une nature exceptionnelle et se produisant entre des idées qui sont très éloignées, seront probablement les plus importantes”¹⁰². Cette image est à rapprocher de l'idée de parentés profondes, mais non apparentes, entre des éléments conceptuels distants, que recouvrent les analogies mathématiques au sens développé par Poincaré. Elles seraient ici saisies dans leur mouvement même.

L'élégance mathématique est la forme de ce qui donne, dans les mots de Poincaré, “l'harmonie” et “la beauté intellectuelle”¹⁰³, qui correspondent à l'instantanéité de l'évidence, à laquelle se ramène en fin de compte, pour Poincaré et pour Einstein, comme pour Descartes trois siècles avant¹⁰⁴, l'intelligibilité.

Les psychologues Paul Souriau et F. Paulhan qui s'intéressèrent à l'invention, cités par Hadamard, défendaient sur ce sujet des points de vue contraires : Souriau estimait qu'elle se produit au hasard¹⁰⁵, tandis que Paulhan y voyait, plus classiquement, l'effet du raisonnement¹⁰⁶. Pour Hadamard, l'activité mentale inconsciente, essentielle à ses yeux dans ces processus, ne s'effectue nullement au hasard : “La découverte, écrit-il, dépend nécessairement de l'action préliminaire plus ou moins intense du conscient”, soulignant ce qu'avait dit Poincaré sur l'action directrice de la conscience sur l'inconscient, définissant “plus ou moins la direction générale dans laquelle cet inconscient doit travailler”¹⁰⁷.

Cette directivité du conscient sur l'inconscient est désignée par d'autres philosophes dans les termes plus précis d'une sorte de schème général des processus de la pensée. Théodore Ribot proposait une espèce d'algébrisation des signes mentaux en fonction du problème considéré dans ses termes rationnels : on résout un problème en le supposant d'abord résolu, et l'on cherche quelle combinaison d'éléments permet la solution : on va d'abord au résultat, puis l'on revient en arrière pour établir le fil qui y mène¹⁰⁸. Reprenant cette idée dans sa réflexion sur «l'effort intellectuel», Bergson ajoutait que “le tout s'offre comme un schéma”, que “l'invention consiste précisément à convertir le schéma en image”, et l'image contient “les moyens par lesquels l'effet s'accomplit”¹⁰⁹. Transcrivant dans ces concepts la remarque du psychologue Paulhan¹¹⁰ que l'invention littéraire et poétique va “de l'abstrait au concret”, Bergson écrivait que l'invention, artistique ou scientifique, va “du tout aux parties et du schéma à l'image”.

L'effort mental suppose, pour Bergson, des “éléments intellectuels en voie d'organisation”, avec une tendance au “monoidéisme”, qui est un état caractéristique de l'attention : l'unité (mais qui n'est pas simplicité) ainsi désignée est celle d'une “idée directrice commune à un grand nombre d'éléments organisés”.

¹⁰² Hadamard [1945], éd. fr., p. 52-53.

¹⁰³ “Le choix des faits”, in Poincaré [1908a], éd. 1918, p. 15-17.

¹⁰⁴ Paty [à paraître, a].

¹⁰⁵ Souriau [1881].

¹⁰⁶ Paulhan [1904].

¹⁰⁷ Hadamard [1945].

¹⁰⁸ Ribot [1900].

¹⁰⁹ Bergson [1919], in [1959], p. 947.

¹¹⁰ Paulhan [1901].

Il ajoutait : “c'est l'unité même de la vie”. Cet effort intellectuel sur des images qui n'ont entre elles qu'une “ressemblance tout intérieure”, comme une “identité de signification”¹¹¹, rappelle les analogies mathématiques de Poincaré.

Dans un sens assez voisin, Meyerson s'interrogeait sur les schémas que la raison avait suivis en constituant les images du réel, celles, par exemple, de la physique, ou du moins sur les “tendances auxquelles obéit l'esprit du chercheur”, et que “la raison cherche à faire prévaloir...”¹¹². Il liait son enquête à l'insuffisance des conceptions aprioriste et empiriste par rapport aux acquis des sciences, notamment des mathématiques, et à la connaissance des “véritables ressorts du raisonnement mathématique”. S'il voyait, pour sa part, ces derniers dans un mouvement du divers vers l'identique, ce n'était pas une reconstitution ni une réduction aux formes de rationalité qui nous sont familières avec la science actuelle, et son propos d'interroger les formes historiques de la connaissance consonnait, pour lui, avec celui des anthropologues soucieux de comprendre la logique propre de la “mentalité primitive” (comme les schémas de participation de Lévy-Bruhl¹¹³). Sous la diversité des formes de raisonnement il décelait un schéma commun à toute pensée humaine. Quoiqu'il en soit de sa théorie propre, le problème ainsi abordé reste posé.

Les descriptions par les philosophes mentionnés -et singulièrement celles de Bergson- tendent donc également à montrer l'importance *épistémologique* des processus de la pensée créatrice. Après tout, c'est par de telles créations que les objets de la pensée sont posés, comme représentations du monde, toutes provisoires soient-elles, et que la science existe. Il apparaît clair, dès lors, qu'il ne suffit pas d'analyser les formes sous lesquelles elle se trouve communiquée et ratifiée, mais qu'il importe de savoir comment il se fait que des éléments de connaissances soient apparus dans la nouveauté de ce qui, inexistant jusqu'alors, est, à un certain moment, inventé et créé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

D'ALEMBERT, Jean le Rond [1751]. *Discours Préliminaire de l'Encyclopedie*, in d'Alembert, & Diderot [1751], vol. 1 ; Ré-éd., Gonthier, Paris, 1965.

d'ALEMBERT, Jean le Rond, et DIDEROT, Denis (dirs.) [1751-1780]. *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, 17 vols + 11 vol. de planches, Briasson, David, Le Breton et Durant, Paris, 1751-1780.

AMPERE, André-Marie [1834]. *Essai sur la philosophie des sciences, ou Exposition analytique d'une classification naturelle de toutes les connaissances humaines*, Bachelier, Paris, 1834 ; Réimpr., Culture et Civilisation, Bruxelles, 1966.

BERGSON, Henri [1919]. *L'énergie spirituelle*, Alcan, Paris, 1919.

- [1934]. *La pensée et le mouvant*, Alcan, Paris, 1934 ; in Bergson [1959], p. 1249-1482.

¹¹¹ Bergson [1919], in [1959], p. 958.

¹¹² Meyerson [1931], vol. 1, p. xix. Voir Meyerson [1921].

¹¹³ Meyerson [1931], vol. 1, p. 81.

- [1959]. *Oeuvres*. Edition du centenaire, éd. par André Robinet, Presses Universitaires de France, Paris, 1959 ; 1963.
- BOUTROUX, Emile [1874]. *De la contingence des lois de la nature*, Thèse de doctorat, Paris, 1874 ; 6^e éd., Alcan, Paris, 1908.
- BOUTY, Edmond [1908]. *La vérité scientifique. Sa poursuite*, Flammarion, Paris, 1908 ; 1920.
- COMTE, Auguste [1830-1842]. *Cours de philosophie positive*, 6 vols., Paris, 1830-1842.
- DESCARTES, René [v. 1628]. *Regulæ ad directionem ingenii*, in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 10, p. 349-486 ; trad. en français par J. Sirven, *Règles pour la direction de l'esprit*, Vrin, Paris, 1970.
- [1633]. *Le Monde ou Traité de la lumière*, in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 11, p. 1-118.
- [1637a]. *Discours de la méthode*, in Descartes [1964-1974] (AT), vol.6, p. 1-78.
- [1637b]. *La Géométrie*, in Descartes [1964-1974] (AT), vol. 6, p. 367-486.
- [1964-1974]. *Oeuvres de Descartes*, publiées par Charles Adam et Paul Tannery, 11 volumes (1^{ère} éd., 1896-1913) ; nouvelle édition révisée, 1964-1974 ; ré-éd., 1996. [Edition indiquée AT].
- DIDEROT, Denis [1753]. *Sur l'interprétation de la nature*, Paris, 1753 ; éd. remaniée, 1754. In Diderot, *Oeuvres philosophiques*, éd. par Pierre Vernière, Garnier, Paris, 1964.
- DUHEM, Pierre [1905]. *La théorie physique, son objet, sa structure*, Paris, 1905.
- EINSTEIN, Albert [1920]. Grundgedanken und Methoden der Relativitätstheorie in ihrer Entwicklung dargestellt, manuscrit inédit (Bibliothèque Pierpont Morgan, New York, copie aux Archives Einstein) [Les idées fondamentales et les méthodes de la théorie de la relativité exposées selon leur développement]. [Trad. angl. inédite par John Stachel, Fundamental ideas and methods of the theory of relativity presented in their evolution, aimablement communiquée par son auteur].
- [1922]. How I created the theory of relativity (Conférence prononcée en allemand à l'université de Kyoto, le 14 décembre 1922). Texte anglais d'après la transcription en japonais in Jun Ishiwara, *Einstein kyozyu kôen-roko* (The record of professor Einstein's lectures, Tokyo, 1923 ; reprinted, Tokyo 1971) ; traduit par Yoshimasa Ono, *Physics To day*, august 1982 ; reprod. in Weart, Spencer & Philipps, Melba (eds.), *History of physics, Readings from Physics To day*, number 2, American Institute of Physics, New York, 1985, p. 243-245.
- [1933]. *On the method of theoretical physics*, The Herbert Spencer lecture, Oxford, june 10, 1933 ; repris in Einstein [1954], p. 265-270. Original allemand, Zur Methodik der theorischen Physik, in Einstein [1934], ed. 1960, p. 113-119. Trad. fr., Sur la méthodologie de la physique théorique, in Einstein [1989-1993], vol. 5, p. 102-106.
- [1934]. *Mein Weltbild*, Querido, Amsterdam, 1934. Ré-édition [modifiée et augmentée de textes plus récents], Herausgeben von Carl Seelig, Europa-Verlages, Zurich, 1953 ; Ullstein Bücher, West-Berlin, 1960.
- [1936]. Physik und Realität, *Franklin Institute Journal*, 221, 1936, 313-347. Trad. angl., Physics and reality, *Franklin Institute Journal*, 221 1936, 349-382 ; Trad. fr., Physique et réalité, in Einstein [1989-1993], vol. 5, p. 125-151.
- [1941]. The common language of science [Broadcast recording for Science conference, London, 28.9.1941], *Advancement of science* (London), 2, 1941, n° 5. Trad. fr., Le langage commun de la science, in Einstein [1989-1993], vol. 5, p. 169-170.

- [1944]. Bemerkungen zu Bertrand Russells Erkenntnistheorie, in Schilpp, Paul Arthur (ed.), *The philosophy of Bertrand Russell*, Northwestern University Press, Evanston (Ill.), 1944. Trad. fr., Remarques sur la théorie de la connaissance de Bertrand Russell, in Einstein [1989-1993], vol. 5, p. 107-111.
 - [1945]. [Testimonial] in Jacques Hadamard, *An Essay on the psychology of invention in the mathematical field*, Princeton University Press, Princeton, 1945 ; republié sous le titre : A mathematician's mind, in Einstein [1954], p. 35-36. Trad. fr. [Lettre à Jacques Hadamard], in Hadamard [1945], éd. fr., p. 82-83.
 - [1946]. Autobiographisches. Autobiographical notes (1946), in Schilpp, P.A. (ed), *Albert Einstein , philosopher and scientist*, The library of living philosophers, Open Court, La Salle (Ill.), 1949, p. 1- 95. Trad. fr., Eléments autobiographiques, in Einstein [1989-1993], vol. 5, p. 19-54.
 - [1954]. *Ideas and Opinions*, transl. by Sonja Bergmann, Crown, New-York, 1954. Ré-éd. Laurel, New-York, 1981 [édition utilisée].
 - [1987-1998]. *The Collected Papers of Albert Einstein*, Edited by John Stachel, Martin Klein et al., Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1987-1998, 8 vols. parus.
 - [1989-1993]. *Oeuvres choisies*, Trad. fr. par le groupe de trad. de l'ENS Fontenay-St-Cloud et al., édition publiée sous la dir. de Françoise Balibar. Seuil/éd. du CNRS, Paris, 6 vols., 1989-1993.
- EINSTEIN, Albert & BESSO, Michele [1979]. *Correspondance 1903-1955*, publiée par Pierre Speziali, Hermann, Paris, 1972. [Textes originaux et traduction en français.] Nouvelle éd., seulement trad. fr., 1979.
- EISENSTAEDT, Jean & KOX, A. J. (eds.) [1992]. *Studies in the History of General Relativity*, Einstein Studies Series, 3, Birkhäuser, Boston, 1992.
- FEYERABEND, Paul [1975]. *Against Method*. Trad. fr. par Baudouin Jurdant et Agnès Schlumberger, *Contre la méthode, esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance*, Seuil, Paris, 1979.
- HADAMARD, Jacques [1945]. *An essay on the psychology of invention in the mathematical field*, Princeton University Press, Princeton (N.J.), 1945. Trad. fr. par Jaqueline Hadamard, *Essai sur la psychologie de l'invention dans le domaine mathématique*, Gauthier-Villars, Paris, 1975.
- HELMHOLTZ, Hermann von [1882-1895]. *Wissenschaftliche Abhandlungen*, 3 vol., Leipzig, 1882-1895.
- [1921]. *Schriften zur Erkenntnistheorie*, herausgegeben und erläutert von Paul Hertz und Moritz Schlick, Springer, Berlin, 1921.
 - [1971]. *Selected writings*. Ed. by Russell Kahl, Middletown (Conn.), 1971.
 - [1978]. *Epistemological writings*. The Paul Hertz/Moritz Schlick centenary edition of 1921 with notes and commentary by the editors ; newly transl. by Malcolm F. Lowe. Ed. with an Introduction and bibliography by R.S. Cohen and Y. Elkana, Reidel, Dordrecht and Boston, 1978. [Trad. et édition en anglais de Helmholtz 1921.]
- HOLTON, Gerald [1978]. *The Scientific Imagination. Case Studies*, Cambridge University Press, 1978.
- HOLTON, Gerald & ELKANA, Yehuda (eds.) [1982]. *Albert Einstein, historical and cultural perspectives: the centennial symposium in Jerusalem*, Princeton University Press, Princeton, 1982.
- HOWARD, Don & STACHEL, John (eds.) [1989]. *Einstein and the History of General Relativity*, Einstein Studies Series, 1, Birkhäuser, Boston, 1989.
- JAKOBSON, Roman [1980]. Einstein and the science of language, in Holton,

Elkana [1982], p. 139-150. Trad. fr. par Catherine Malamoud : Einstein et la science du langage, *Le débat*, n° 20, mai 1980, 131-142.

JAMES, William [1907]. *Pragmatism : a new name for old ways of thinking*, 1907. Trad. fr. par E. Le Brun et M. Paris, Préface de Henri Bergson, *Le pragmatisme*, Flammarion, Paris, 1911.

- [1909]. *A Pluralist Universe*, London, 1909 ; trad. fr. par E. Le Brun et M. Paris, *Philosophie de l'expérience*, Flammarion, Paris, 1910.

- [1912]. *Essays in Radical Empiricism*, 1912.

- [1917]. *Selected Papers on Philosophy*, Dent & Sons, London, 1917 ; 1956.

KANT, Immanuel [1781, 1787]. *Critik der reinen Vernunft*, J.F. Hartknoch, Riga, 1781; 2è éd., modifiée, 1787. Trad. fr. par Alexandre J.L. Delamarre et François Marty, *Critique de la raison pure*, in Kant, Emmanuel, *Oeuvres philosophiques*, vol. 1, Gallimard, Paris, 1980, p. 705-1470.

KUHN, Thomas L. [1962]. *The Structure of Scientific Revolutions* (1962), 2nd rev. enlarged ed., University of Chicago Press, 1970. Tr. fr., *La Structure des Révolutions Scientifiques*, Flammarion, Paris, 1972.

LAGRANGE, Joseph Louis [1788]. *Mécanique analytique*, Paris, 1788; 2ème éd., 1811.

LAKATOS, Imre [1978]. *The methodology of scientific research programmes. (Philosophical papers, vol. 1)*, Edited by John Worrall and Gregory Currie, Cambridge University Press, Cambridge, 1978.

LALANDE, André [1929]. *La théorie de l'induction et de l'expérimentation*, Boivin, Paaris, 1929.

- [1948]. *La raison et les normes*, Hachette, Paris, 1948.

LE ROY, Edouard [1905]. Sur la logique de l'invention, *Revue de métaphysique et de morale*, mars 1905.

MACH, Ernst [1883]. *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch Dargestellt*, Leipzig, 1883. Trad. fr., *La mécanique. Exposé historique et critique de son développement*, Hermann, Paris, 1904; ré-éd., 1923.

- [1886]. *Beiträge zur Analyse der Empfindungen*, Iéna, 1886; *Contributions to the the analysis of the sensations*, tr. C.M. Williams, Open Court, Chicago, 1897.

- [1898]. *Popular scientific lectures*, tr. T.J. McCormack, Chicago, Open Court, 1898.

- [1905]. *Erkenntnis und Irrtum*, Leipzig, Barth, 1905; *La connaissance et l'erreur*, Trad. fr. M. Dufour, Flammarion, Paris, 1908; 1922; *Knowledge and error*, tr. T.J. McCormack, P. Foulkes, Dordrecht, Reidel, 1976.

MEYERSON, Emile [1921]. *De l'explication dans les sciences*, 2 vols., Payot, Paris, 1921.

- [1931]. *Du cheminement de la pensée*, 3 vols., Alcan, Paris, 1931.

MILLER, Arthur I. [1984]. *Imagery in scientific Thought. Creating 20th Physics*, Birkhauser, Boston, 1984.

PATY, Michel [1977]. *Théorie et pratique de la connaissance chez Jean d'Alembert*, Thèse de doctorat en philosophie, Université des Sciences Humaines, Strasbourg 2, 1977.

- [1986]. Einstein and Spinoza, in Marjorie Grene and Debra Nails (eds), *Spinoza and the sciences*, Reidel, Dordrecht, 1986, p. 267-302.

- [1993]. *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1993.

- [1996a]. Poincaré et le principe de relativité, in Greffe, Jean-Louis; Heinzmann, Gerhard et Lorenz, Kuno (éds.), *Henri Poincaré. Science et philosophie. Science and philosophy. Wissenschaft und Philosophie. Congrès international, Nancy, France, 14-18 mai 1984*, Akademie Verlag, Berlin/Albert Blanchard, Paris, 1996, p. 101-143.
 - [1996b]. Le style d'Einstein, la nature du travail scientifique et le problème de la découverte, *Revue philosophique de Louvain*, 94, 1996 (n°3, août), 447-470.
 - [1997]. «*Mathesis universalis*» e inteligibilidad en Descartes, Trad. en español por Martha Cecilia Bustamente, in Albis, Victor R. ; Charum, Jorge ; Sanchez, Clara Helena ; Serrano, Gonzalo (eds.), *Memorias del Seminario en conmemoración de los 400 años del nacimiento de René Descartes*, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Colección Memorias, n°9, 1997, p. 135-170. (Original fr. : «*Mathesis universalis*» et intelligibilité chez Descartes, in Karine Chemla et al. (éds.), *Ceci n'est pas un Festschrift. Mélanges offerts à Imre Toth* (29.12.1996), à paraître).
 - [1999]. La place des principes dans la physique mathématique au sens de Poincaré, in Jan Sebestik et Antonia Soulez (éds.), *Actes du Colloque Philosophie et Science au tournant du siècle: Mach, Boltzmann, Poincaré et Duhem, Paris, 29 mai-1er juin 1995*, *Fundamenta philosophiæ* (Nancy) 3 (2), 1998-1999, 75-90.
 - [à paraître, a]. *Einstein, les quanta et le réel. Critique et construction théorique*, à paraître.
 - [à paraître, b]. L'analogie mathématique au sens de Poincaré et sa fonction en physique, in Durand-Richard, Marie-José (éd.), *Le statut de l'analogie dans la démarche scientifique*, Editions du CNRS, Paris, à paraître.
 - [en préparation]. *Empirisme et convention. Géométrie, physique et philosophie chez Poincaré*.
- PAULHAN, F. [1901]. *Psychologie de l'invention*, Paris, 1901.
- POINCARÉ, Henri [1880a]. Mémoire (n° 5) soumis au Concours pour le Prix des Sciences Mathématiques, Académie des Sciences (1er juin 1880). *Archives, Dossier Poincaré*. La seconde partie, sur les fonctions fuchsienues, a été publiée pour la première fois dans *Acta Mathematica*, 39, 1923, 58-93 ; repris dans Poincaré [1913-1965], vol. 1, p. 336-373.
- [1880b]. Suppléments au mémoire soumis au Concours pour le Prix des Sciences Mathématiques, *Académie des Sciences. Archives, Dossier Poincaré*. (Séances des 28 juin, 6 septembre, et manuscrit reçu le 20 déc. 1880). Publié dans Poincaré [1996].
 - [1889]. Du rôle de l'intuition et de la logique en mathématiques, in *Comptes rendus du Deuxième Congrès International des Mathématiciens*, Paris, 1989, p. 115-130. Repris dans Poincaré [1913-1965], vol. 11, p. 129-133. Publié également sous le titre : La logique et l'intuition dans la science mathématique et dans l'enseignement, *L'Enseignement mathématique* 1, 1889, 157-162. Repris avec modifications dans Poincaré [1905], chapitre 1.
 - [1894c]. Sur la nature du raisonnement mathématique, *Revue de métaphysique et de morale* 2, 1894, 371-384. Repris in Poincaré [1902], chap. 1.
 - [1897]. Sur les rapports de l'analyse pure et de la physique mathématique, *Acta mathematica* 21, 1897, 331-341 ; republié dans Poincaré [1991], p. 17-30. Egalement paru, avec des modifications, sous le titre "Les rapports de l'analyse et de la physique mathématique", *Revue générale des sciences pures et appliquées* 8, 1897, 857-861 ; repris dans Poincaré 1905 [chapitre 5 : "L'analyse et la physique"], éd. 1970, p. 103-113.
 - [1902]. *La science et l'hypothèse*, Flammarion, Paris, 1902 ; 1968.

- [1905]. *La valeur de la science*, Flammarion, Paris, 1905 ; 1970.
 - [1908a]. *Science et méthode*, Flammarion, Paris, 1908 ; 1918.
 - [1908b]. Comment on invente. Le travail de l'inconscient, *Le Matin* (Paris), 24 déc. 1908.
 - [1908c]. L'invention mathématique, *Bulletin de l'Institut Général de Psychologie*, 8^e année, 1908 (n° 3), 175-196 [Conférence à la Société de Psychologie de Paris]. Egalement, *L'enseignement mathématique* 10, 1908, 359-371 ; repris dans Poincaré [1908a], éd. 1918, p. 43-63.
 - [1908d]. Le choix des faits, *The Monist*, 1909, 231-232. Publié dans Poincaré [1908a], livre 1, chap. 1, éd. 1918, p. 16-18.
 - [1913]. Analyse des travaux scientifiques de Henri Poincaré faite par lui-même (avant 1913), *Acta Mathematica* 38, 1921, 3-135. (Repris dans [1916-1965], réparti dans les différents volumes suivant les matières.)
 - [1916-1965]. *Oeuvres*, Gauthier-Villars, Paris, 11 vols., 1916-1965.
 - [1991]. *L'analyse et la recherche*, choix de textes et introduction de Girolamo Ramunni, Hermann, Paris, 1991.
 - [1996]. *Trois suppléments sur la découverte des fonctions fuchsiennes. Three Supplementary Essays on the Discovery of Fuchsian Functions*, éd. par Jeremy J. Gray et Scott A. Walter, Akademie Verlag, Berlin/Albert Blanchard, Paris, 1996.
- POPPER, Karl [1935]. *Logik der Forschung. Zur Erkenntnistheorie der modernen Naturwissenschaft*, Springer Verlag, Wien, 1934. Ré-éd. avec additions, 1959 ; 1968. Trad. angl., *The logic of scientific discovery*, 1959 ; 1968. Trad. fr. par Nicole Thyssen-Rutten et Philippe Devaux, *La logique de la découverte scientifique*, Payot, Paris, 1973.
- [1972]. *Objective knowledge, an evolutionary approach*, Clarendon Press, Oxford, 1972. Trad. fr. partielle par C. Bastyns, *La connaissance objective*, Complexe, Bruxelles, 1978.
- REICHENBACH, Hans [1938]. *Experience and prediction*, University of Chicago Press, Chicago, 1938.
- REY, Abel [1907]. *La théorie de la physique chez les physiciens contemporains*, Alcan, Paris, 1907.
- [1911]. *La philosophie moderne*, Flammarion, Paris, 1911.
- RIBOT, Théodule [1900]. *Essai sur l'imagination créatrice*, Paris, 1900.
- SPINOZA, Baruch [v. 1656]. *Court Traité*, in Spinoza, *Oeuvres*, éd. et trad. par Charles Appuhn, vol. 1, Garnier-Flammarion, 1964.