

L'« ÉCOLE DE L'ETH »
DANS L'ŒUVRE DE GASTON BACHELARD
LES FIGURES SPECTRALES D'HERMANN WEYL,
WOLFGANG PAULI ET GUSTAVE JUVET

Charles ALUNNI

RÉSUMÉ : Il s'agit de retracer ici la présence spectrale dans l'œuvre de Gaston Bachelard de ce que nous appelons « École de l'ETH ». Nous en avons choisi trois figures fondamentales : Hermann Weyl, Wolfgang Pauli et Gustave Juvet. Pour le premier, nous traitons de sa place centrale et permanente dans la constitution bachelardienne d'une philosophie qui se veut à hauteur de la nouvelle « géométrie physique » rigoureusement construite dans un esprit riemannien. Quant à Pauli, nous montrons une insoupçonnable affinité qui est étayée par les analyses remarquables qu'en donna le philosophe : de la construction urgente d'une « métaphysique quantique », qui se fonde sur les implications d'un *principe de Pauli* bien compris, à l'idée de « particule métaphysique », en passant par les enjeux décisifs et si prometteurs du « postulat de non-analyse ». Dans le cadre de cette polyconstruction convergente de l'entreprise « surrationaliste », nous traitons de la troisième figure, moins connue mais tout aussi marquante, du mathématicien-philosophe Gustave Juvet.

MOTS-CLÉS : épistémologie, géométrie, physique, structure, substance, relativité, théorie quantique, algèbrisme, neutrino, Bachelard, Cavaillès, Clifford, Wheeler.

ABSTRACT : We retrace here spectral presence in the work of Gaston Bachelard which we call « The School of the ETH ». We have chosen three fundamental figures : Hermann Weyl, Wolfgang Pauli and Gustave Juvet. For the first one, we consider his central and permanent place in the Bachelardian constitution of a philosophy which seeks to be at the height of the new « physical geometry » rigorously constructed in a Riemannian spirit. As for Pauli, we show an unsuspected affinity which is backed up by the remarkable analyses brought to it by philosophy : from the urgent construction of a « quantic metaphysics », founded on the implications of a Pauli principle well understood, to the idea of a « metaphysical particle », going on to the decisive and so promising stakes of the « postulate of non-analysis ». In the framework of this convergent polyconstruction of the « surrationalist » enterprise, we treat the third figure, less known but equally important, of the mathematician-philosopher Gustave Juvet.

KEYWORDS : epistemology, geometry, physics, structure, substance, relativity, quantic theory, algebrism, neutrino, Bachelard, Cavaillès, Clifford, Wheeler.

ZUSAMMENFASSUNG : Es geht hier um ein Aufspüren der gespensterhaften Präsenz der so genannten « Schule der ETH » im Werk Gaston Bachelards. Wir haben drei grundlegende Figuren gewählt : Hermann Weyl, Wolfgang Pauli und Gustave Juvet. Für den ersten untersuchen wir seinen zentralen und beständigen Ort in Bachelards Entwurf einer Philosophie auf der Höhe der neuen, streng in Riemannischem Geist konstruierten « physikalischen Geometrie ». Mit Bezug auf Pauli zeigen wir eine unzweifelhafte, durch bemerkenswerte Untersuchungen des Philosophen gestützte Verwandtschaft : von der Konstruktion einer « Quantenmetaphysik » die sich auf die Implikationen des wohlverstandenen Pauliprinzipts gründet, bis zur Idee des « metaphysischen Teilchens », vermittelt durch das entscheidende und viel versprechende Spielgeld des « Postulats der Nicht-Analyse ». Im Rahmen dieser konvergenten Polykonstruktion der « surrationalistischen » Unternehmung behandeln wir die weniger bekannte, aber markante Figur des Mathematiker-Philosophen Gustave Juvet.

STICHWÖRTER : Epistemologie, Geometrie, Physik, Struktur, Substanz, Relativität, Quantentheorie, Neutrino, Bachelard, Cavailles, Clifford, Wheeler.

Charles ALUNNI, né en 1951, fut cofondateur et secrétaire technique du Groupe de recherches sur l'enseignement de la philosophie, fondé à l'École normale supérieure de Paris (rue d'Ulm) en 1975 à l'initiative de Jacques Derrida. Directeur de programme au Collège international de philosophie de 1983 à 1989 et *Gastdozent* au département de philosophie de l'université de Bochum (Allemagne) de 1983 à 1987, il est actuellement chargé de recherche en histoire de la philosophie à l'École normale supérieure de Pise (Italie), et professeur détaché à l'École normale supérieure de Paris, où il dirige depuis 1994 le Laboratoire disciplinaire « Pensée des sciences ».

Adresse : École normale supérieure, Laboratoire disciplinaire « Pensée des sciences », 45 rue d'Ulm, 75 230 Paris cedex 05.

Courrier électronique : Charles.Alunni@ens.fr

À Alain Connes et Jean-Pierre Bourguignon

Posons dès le départ le syntagme « École de l'ETH » comme un marqueur spectral d'une constellation de pensées singulières, et donc uniques, mais néanmoins articulées (et non isolées dans un solipsisme). « Spectral » est ici à prendre d'abord comme opérateur de déclinaisons « discrètes » des singularités philosophiques exprimées dans chaque corpus référé, comme zone d'« interférences » de domaines d'explication et de problématisation ; le modèle de cet « opérateur spectral » tient dans cette connexion « magique » du Janus mathématico-physique. C'est la caractéristique « spectrale » purement mathématique de l'espace abstrait de David Hilbert (élaboré par lui dès 1910) qui permettra plus tard à Werner Heisenberg d'induire de manière géniale qu'il constitue en réalité la lisibilité possible des « formes » apparaissant sur le spectre de fréquences d'un corps (sur la base du principe de combinaison ou « loi de composition » de Walter Ritz¹ et Johannes Robert Rydberg). Dès lors, tout corps physique trouve sa signature dans son « spectre » quantique². Notons au passage que l'« exemple pratique » et paradigmatique du « mixte » mathématique chez Albert Lautman n'est autre que ce même espace de Hilbert : *continu* pour la topologie de ses éléments ; *discontinu* pour ses décompositions structurales³.

Mais « spectral » renverra pour nous également à ces présences « fantomales » qui hantent le grand œuvre de Gaston Bachelard, sous la forme de cette constellation époquale que notre ami Mario Castellana qualifie de « “néo-rationalisme” italo-francophone ». Lieu d'instauration d'une immense « tradition » épistémologique, notre présent devrait commencer à en prendre toute la mesure. À titre d'exemplification « historique » l'un des référents hautement symbolique de cette constellation fut en son temps représenté par le groupe d'opposition théorique au *Wiener Kreis* lors du congrès Descartes de 1937 (Bachelard, « l'hôte muet » du congrès, Federigo Enriques l'Italien, Ferdinand Gonseth le Suisse, Jean Cavaillès et Albert Lautman les deux Français ; on pourrait y ajouter les « protagonistes anonymes » tels que Paulette Destouches-Février, Jean-Louis Destouches, André Lalande, etc.)⁴.

1. Walter Ritz, physicien suisse mort à 32 ans (1878-1909), qui enseigna à Zurich et Göttingen, est cité par Bachelard dès 1931, comme un héraut de la « nouvelle physique » : « Mais voici que la Physique contemporaine nous apporte des messages d'un monde inconnu. Ces messages sont rédigés en “hiéroglyphes”, suivant l'expression de Walter Ritz », « Noumène et microphysique », in BACHELARD, 1970, p. 12.

2. Voir le dialogue de Marc Schützenberger et d'Alain Connes dans CONNES, LICHNEROWICZ, SCHÜTZENBERGER, 2000. Connes n'a de cesse, dans ses conférences récentes, d'insister sur la « magie » de ce lien entre caractéristique « spectrale » d'un espace abstrait (espace de Hilbert) et la « spectroscopie » concrète en physique. Il renvoie ce nœud paradigmatique du physico-mathématique contemporain au « fantôme » de Georg Friedrich Bernhard Riemann (à son « spectre » en quelque sorte) et à sa révolution d'une géométrie littéralement « faite » pour la physique. Nous allons voir comment Bachelard a très précisément pointé cela chez Riemann et Hermann Weyl.

3. Voir *infra*, p. 443-449, le texte de Jürg Fröhlich, « Réflexions sur Wolfgang Pauli ».

4. *Travaux du IX^e Congrès international de philosophie (Congrès Descartes), 1937*. Pour un résumé des enjeux du congrès, voir ALUNNI et BRIAN, 2002, p. 130-131, ainsi que CASTELLANA, 1990.

C'est dire que la mobilisation par Bachelard de ces différents dispositifs mathématiques, physiques et philosophiques n'y sont pas plus occasionnels que vagues. Car il ne s'agit pas, comme c'est la règle chez nombre de ses contemporains philosophes (et des nôtres), de les exhiber comme de pures références autojustificatives ou illustratives d'une philosophie déjà refermée sur son propre système de présupposés. L'enjeu est bien plutôt de les habiter de manière active et « ouverte », de les accompagner dans l'ascétisme de leurs techniques spécifiques, pour leur faire sécréter *in situ* et *in actu* cette puissance spéculative, toujours « disponible », engagée dans leurs gestes de pensée :

« [...] aucun spectre n'est plus étendu que le spectre qui aide à classer les philosophèmes des sciences physiques. Il est d'ailleurs bien entendu que toutes les parties d'une science ne sont pas au même point de maturité philosophique. C'est donc toujours à propos d'expériences et de problèmes bien définis qu'il faut déterminer les valeurs philosophiques de la science⁵. »

C'est donc en tant que « située » en des *topoi* et sur des nœuds textuels parfaitement identifiables, qu'il nous faut tenter de retracer cette présence spectrale de « l'École de l'ETH » (ses enjeux théoriques, à la fois scientifiques et philosophiques – pour ne pas dire « métaphysiques » –, ses solidarités induites, ses potentialités produites). Au choix limité de certains *loci* du texte bachelardien, doit répondre un choix de signatures limitées des représentants de cette École, dont la « proximité » de voisinage ne se limitait pas à la seule fréquentation d'une même *Eliteschule*.

Nous tournerons notre attention exclusivement vers certains noms de l'ETH auprès desquels Bachelard s'est ressourcé en permanence, diffusant et prolongeant par là même leur travail réflexif : Herman Weyl, Wolfgang Pauli, et *last but not least*, Gustave Juvet. Il aurait évidemment fallu thématiser les rapports de connivence du texte bachelardien avec d'autres éminents représentants de cette « École de l'ETH » : Albert Einstein ou Ferdinand Gonseth. Pour le premier, nous avons déjà entamé ce travail ailleurs ; quant au second, il en est question très en détail dans d'autres textes de ce volume.

I. – HERMANN WEYL ET LA « TRANSITION DE PHASE » VERS UNE GÉOMÉTRIE PHYSIQUE

Hermann Weyl apparaît dès l'origine comme une présence « initiatique » dans l'œuvre bachelardienne. Il est convoqué tant dans son *Essai sur la connaissance approchée* qui constitua sa thèse principale pour le doctorat présentée devant la faculté des lettres de l'université de Paris, le 23 mai 1927, que dans sa thèse complémentaire présentée le 28 mars de la même année, sous le titre *Étude sur l'évolution d'un problème de physique. La propagation thermique dans les solides*.

Weyl ouvre et clôt pratiquement l'*Essai* en deux occurrence fondamentales. Penchons-nous d'abord sur l'ouverture du chapitre concernant « Les formules de dimension ». Déployons, avant tout, les plis contextuels de cette référence inaugurale. Quelle est l'idée fondamentale de Bachelard dans ce chapitre ? C'est l'interrogation philosophique de la

5. BACHELARD, 1949, p. 7.

« nouvelle métrologie » face à la dualité entre absolu (de l'unité) et arbitraire (de la mesure).

« Par mesure absolue, on ne doit pas entendre une mesure exécutée avec une précision particulière, ni par unité absolue une unité d'une construction parfaite ; en d'autres termes, en faisant usage des mots mesures ou unités absolues, on ne veut pas dire que les mesures faites ou les unités de mesure sont absolument parfaites, mais seulement que ces mesures, au lieu d'être établies par une simple comparaison de la quantité à mesurer avec une quantité de même espèce sont rapportées à des unités fondamentales dont la notion est admise comme axiome.

« Ainsi la *métrologie* est précédée, elle aussi, d'une véritable axiomatique puisqu'elle a pour base des éléments d'une pureté parfaite et posés arbitrairement. Ces éléments, comme des axiomes, seront seulement astreints à former un système cohérent, irréductible, et à être indépendants. Enfin, de même que diverses géométries dérivent de différents ensembles de postulats, de même des systèmes fondamentaux différents s'offrent pour soutenir toutes les mesures de la physique⁶. »

Le décor est planté et, à lui seul, permettrait déjà de lire en filigrane tout un ensemble de problèmes à venir et connexes, ainsi que d'autres faisceaux de citations. Comment intervient ici la première mobilisation de *Temps, espace, matière* de Weyl dans sa traduction Juvet-Leroy de 1922 ?

« Ainsi [à propos de l'arbitraire *masqué* par des habitudes] croit-on que l'arbitraire soit éliminé de la définition de l'unité de volume dès qu'on lie cette unité à l'unité de longueur en choisissant le cube comme volume type ? La *mémoire* est évidemment soulagée puisqu'elle suit la pente de la géométrie élémentaire *traditionnelle* [...]. Mais il y a des points de vue qui s'éclairciraient peut-être avec un autre choix. Ainsi la sphère présente à certains égards des *avantages rationnels* indéniables. C'est elle qui est le volume de définition minima, sa *symétrie* est d'une richesse inépuisable. [...] De même encore dans un espace physiquement anisotrope, il peut y avoir intérêt à dilater ou à contracter certaines coordonnées suivant des fonctions plus ou moins compliquées. C'est un artifice souvent employé dans les nouveaux espaces généralisés. On peut toujours disposer des unités réunies en complexes pour retrancher des diverses mesures géométriques les coefficients numériques – ou tout au moins réduire tous les coefficients à l'unité précédée du signe + ou du signe -. Dans une forme quadratique, seuls les nombres des signes + et des signes - restent des *caractéristiques invariantes* (voir Weyl, *Temps, espace, matière*, p. 20)⁷. »

La référence nous renvoie ici au chapitre I de *Temps, espace, matière*, « L'espace euclidien ; son expression mathématique et son rôle en physique », § 4 : « Les bases de la géométrie métrique ». Le renvoi de pagination est erroné, et il faudrait lire pages 24-27 ; Weyl y affronte les conditions de l'invariance des transformations linéaires orthogonales en coordonnées cartésiennes. C'est techniquement le lieu de passage d'une « théorie de l'invariance », pour des transformations linéaires avec conditions d'orthogonalité, à une théorie de l'« invariance généralisée » dite « calcul tensoriel », corps mathématique de

6. BACHELARD, 1928a, p. 85. Dans les citations, sauf mention contraire, c'est nous qui soulignons.

7. BACHELARD, 1928a, p. 82.

la relativité générale. Weyl conclut ce § 4 par son programme : « Nous développerons donc cette théorie de l'invariance [...] mais de telle manière qu'elle ne rende pas seulement possible l'étude des objets mathématiques, mais encore et surtout l'étude des lois physiques⁸. » Bachelard reprendra très précisément le fil de ce programme weyllien, deux ans plus tard, en 1929, dans *La Valeur inductive de la relativité*. Telle est la conclusion *pro domo* que tire quelques pages plus loin l'auteur de l'*Essai*, après ce premier « passage » à travers Weyl :

« Il semble qu'en allant *des mesures aux idées*, une connaissance se perde rapidement dans le logicisme [peu propre à susciter l'expérience]. C'est par une autre voie, en revenant *de l'esprit vers les choses*, qu'on pourra mobiliser encore la connaissance et lui donner *la souplesse suffisante à toucher le réel*⁹. »

Le point de contact est déjà gros de la trajectoire partagée.

C'est la page 282 du chapitre conclusif de l'*Essai*, intitulé « Rectification et réalité », qui va déployer toute la puissance de connexion et de fibration des approches weylliennes et bachelardiennes. C'est la raison pour laquelle nous allons reconstruire plus patiemment les implicites du contexte.

« Une géométrisation de la matière ne peut être un point de départ, *c'est un schéma*, c'est un but, bref une découverte tardive. En fait, dans la science contemporaine, l'étendue conçue *a priori* comme une qualité uniforme et générale a fait place à une étendue chargée de caractères et *saisie par son côté différentiel*. Et c'est maintenant l'élément différentiel qui détermine "l'explication".

« C'est peut-être le trait le plus frappant de la nouvelle physique. L'idée de Riemann de définir la fonction mathématique par ses variations infinitésimales vient de pénétrer la physique elle-même. Et par un singulier retournement des principes qui va entraîner un véritable bouleversement de l'épistémologie, c'est la loi intégrale qui, de principe, devient la simple conséquence de la relation différentielle. Les "*lois d'action de contact* doivent être considérées comme la vraie expression des dépendances entre les actions qui s'exercent dans la nature" (Weyl, *Temps, espace, matière*, p. 55. La citation est tirée du chapitre I, § 9, "Le champ électromagnétique stationnaire"). »

Et la citation continue :

« "L'idée de comprendre l'univers par son aspect dans l'infiniment petit est la raison épistémologique qui anime la physique des actions de contact et la géométrie riemannienne" (Weyl, *Temps, espace, matière*, p. 79. La citation est tirée du chapitre II, "Le continuum métrique", § 11 "Géométrie riemannienne")¹⁰. »

Dans le premier texte, Weyl compare « la loi de Coulomb comme loi d'action à distance, [qui] exprime que le champ en un point dépend des charges situées en tous les

8. WEYL, 1922, p. 27. Sur l'œuvre de Weyl et les tentatives contemporaines de sa reconstruction, voir SCHOLZ, 2001.

9. BACHELARD, 1928a, p. 92.

10. BACHELARD, 1928a, p. 282.

autres points de l'espace, les plus éloignés comme les plus proches », aux lois d'action de contact :

« [...] beaucoup plus simples d'ailleurs [...], puisque pour la détermination de la dérivée d'une fonction en un point, il suffit de connaître l'allure de cette fonction dans un voisinage arbitrairement petit autour de ce point ; les valeurs de r [densité de charge] et e [le vecteur champ] en un point et dans un voisinage immédiat sont liées par les équations (51) ; [...] l'équation (49) ne doit être considérée que comme une conséquence mathématique des équations (51) : grâce aux équations (51) dont la signification intuitive est si simple, nous croyons *comprendre* d'où vient la loi de Coulomb. Certainement, nous obéissons avant tout à une *contrainte d'ordre épistémologique*¹¹. »

La recherche de cette « contrainte épistémologique » est évidemment la finalité de Bachelard ; et c'est chez Riemann qu'il va en chercher l'axiomatique originaire. C'est aussi dans le rapport Riemann-Weyl que Bachelard exhibe en quelque sorte le « chiffre » de cette révolution géométrique de la physique véritablement imposée par Weyl, et tout particulièrement dans le cadre de la relativité générale. L'interface géométrico-physique à l'avenir prometteur est ainsi mis à nu, avec son déplacement fondamental du rapport *a priori-a posteriori* :

« Des simples lois différentielles $rot e = 0$ et $div e = \rho$ qui expriment que le rotationnel du champ électrique e est nul et que sa divergence en tout point est égale à la densité électrique en ce point, on *déduit* la loi de Coulomb suivant laquelle les corps électrisés s'attirent par une force en raison inverse du carré de la distance. La loi générale cesse donc d'être *a priori*, en facile accord avec un système de catégories, apparentées aux principes logiques, toute proche de l'intuition intellectuelle. Elle est, dans toute l'acception du terme, la conséquence d'un fait, mieux d'un nombre prodigieux de faits. Mais elle ne les résume pas, car elle s'embarrasse de constantes d'intégration¹². »

Il n'y a pas moins de sept occurrences riemanniennes dans l'*Essai*. Cela n'est pas un hasard, pas plus qu'un accident, mais la conscience lucide du lien à Weyl. Reconstituons partiellement le spectre épistémologique de ces références riemanniennes :

« La définition de la fonction [riemannienne] par simple correspondance a ici encore une tout autre souplesse. "Cette définition, dit Riemann, ne stipule aucune loi entre les valeurs isolées de la fonction, car lorsqu'il a été disposé de cette fonction pour un intervalle déterminé, le mode de son prolongement en dehors de cet intervalle reste tout à fait arbitraire". Ainsi la connaissance parfaite d'un *être analytique* dans un domaine déterminé n'implique plus la moindre connaissance en dehors de ce domaine. L'*être*, en Analyse, nous apparaît donc comme le résultat d'une construction qui, dans son principe, sinon toujours en fait, est une *construction libre*.

« En analyse comme en géométrie, les conditions restrictives qui fixent les règles de la construction ne ruinent pas le caractère hypothétique de l'élément analytique défini. Ainsi, en une analogie curieuse, on retrouve pour définir une transcendante, les mêmes

11. WEYL, 1922, p. 79. Il serait sans doute très stimulant de traiter la question de ce que les théories de Feynman doivent à ce schème de l'« action de contact ».

12. BACHELARD, 1928a, p. 282-283.

types de relations conditionnelles que dans l’Axiomatique de la géométrie. “Comme principe de base dans l’étude d’une transcendante, écrit Riemann, il est, avant toute chose, nécessaire d’établir un système de conditions indépendantes entre elles suffisant à déterminer cette fonction”. La transcendante n’établit ainsi entre ses éléments que les seules liaisons qui sont spécifiées par le système des conditions. Elle n’a pas de réalité en dehors de ce système qui doit être, comme un système de postulats, complet et fondamental¹³. »

C’est sur ce socle que s’ouvre toute une problématique à venir concernant les catégories de « réel », de « possible » et de « virtuel », catégories au travail dans toute l’œuvre, et particulièrement thématiques dans *La Valeur inductive de la relativité* de 1929. Et c’est ici un « constructivisme fonctionnel » que Bachelard pointe chez Riemann, qui pourrait se prolonger dans une « ontologie nécessairement projetée » dans « l’existence métaphorique » attribuée à l’être mathématique : une « ontologie constructive [qui] n’est jamais à son terme puisqu’elle correspond plutôt à une action qu’à une trouvaille » portant sur une « réalité de second ordre »¹⁴.

Mais ce qui intéresse également Bachelard, c’est ce que relèvera plus tard Lautman dans sa propre thèse de 1937¹⁵, le fait que, des mathématiques, Riemann a incontestablement une conception structurale¹⁶ : « Certes, au sens de Riemann, *qui est le sens profond*, la fonction [mathématique] ne traduit *que* l’idée de correspondance¹⁷. »

Revenons à Weyl « géomètre de la matière » et à l’importance des lois d’action de contact riemanniennes qu’y relève Bachelard. On verra une forme de communauté spectrale se dégager, quant à certaines conséquences épistémologiques. Le lien Riemann-Weyl tient ici au fait que, du point de vue de la théorie de la connaissance, Riemann a su imaginer que l’infiniment petit renfermait beaucoup plus d’informations essentielles sur la nature, que l’infiniment grand. Il pense à une sorte de solidarité profonde, non contingente entre les modèles mathématiques de l’infiniment petit et les lois physiques suivant lesquelles cet infiniment petit s’exprime et se manifeste dans la nature des phénomènes. Weyl a reconnu à la base de la nouvelle géométrie différentielle de Riemann les mêmes principes théoriques qui ont animé la nouvelle physique des actions de contact. D’où la possibilité d’établir un parallélisme entre la géométrie de Riemann et la physique de Maxwell, que relève à son tour Bachelard comme déterminant le tournant de la « nouvelle physique ». Dans un article important (contemporain de la première édition de *Raum, Zeit, Materie*, 1918) où Weyl entreprend le projet d’élaborer

13. BACHELARD, 1928a, p. 184-185.

14. BACHELARD, 1929, p. 186. Sur le statut singulier de la métaphore scientifique (et philosophique) chez Bachelard, voir ALUNNI, 2001.

15. « Essai sur les notions de structure et d’existence en mathématiques », in LAUTMAN, 1977, p. 23-154.

16. « Les schémas de structures », in LAUTMAN, 1977, p. 31-86.

17. BACHELARD, 1928a, p. 201. « Le rationalisme est une activité de structuration. Si Bachelard n’a pas consacré d’étude spéciale à l’épistémologie structurale, c’est que toute sa recherche épistémologique est précisément structurale, ce n’est pas faute, on en conviendra, d’ignorer que la mathématique contemporaine est purement – mais non simplement – formelle, opérationnelle, structurale (voir *La Philosophie du non*, p. 133) », in CANGUILHEM, 1963. Ce texte important, l’un des très rares à interroger sérieusement le concept bachelardien de « dialectique », a été repris in CANGUILHEM, 1968, ici 1981, p. 202.

une « pure géométrie infinitésimale » (*reine Infinitesimalgeometrie*) et où, par là, il poursuit celui de construire une théorie généralisée purement géométrique des phénomènes physiques, il affirme :

« La *théorie de la relativité générale* admet, conformément à l'esprit de la physique moderne, des actions de contact seulement ce qui a une validité dans l'infiniment petit [c'est-à-dire localement], et en ce qui concerne la métrique de l'Univers (*Weltmetrik*), elle fait appel au concept général de détermination métrique fondée sur une *forme différentielle* quadratique, proposé par Riemann dans son *Habilitationsvortrag* de 1854. Mais l'élément vraiment important de cette nouveauté est la vue selon laquelle la métrique n'est pas une propriété de l'Univers en soi (*an sich*) ; bien plutôt, comme forme des phénomènes, l'espace-temps est un continuum quadridimensionnel complètement amorphe, au sens de l'*Analysis situs*, la métrique exprimant toutefois quelque chose de réel qui a une existence dans l'Univers, exerçant des effets sur la matière par le biais de forces centrifuges et gravitationnelles et dont l'état, inversement, est également conditionné, selon les lois de la nature (*naturgesetzlich*), par la distribution et la constitution de la matière. »

Enfin Weyl conclut :

« D'après cette théorie [la "géométrie infinitésimale pure"], tout ce qui est réel, c'est-à-dire tout ce qui existe dans l'Univers, est une manifestation de la métrique de l'Univers ; les concepts de la physique ne sont pas quelque chose d'autre que ceux de la géométrie (*die physikalischen Begriffe sind keine andern als die geometrischen*). La seule différence entre la géométrie et la physique tient dans ce que la géométrie sonde de manière générale la nature essentielle des concepts métriques, mais c'est la physique qui, de son côté, enquête sur la loi en vertu de laquelle l'Univers réel se distingue de tous les espaces métriques quadridimensionnels possibles, d'après leur géométrie¹⁸. »

Au plus près de la pensée de Riemann, de la manière la plus cohérente et la plus profonde, Weyl développe ici l'idée philosophique que la métrique exprime à la fois un élément *a priori* et *a posteriori* de l'espace. On voit ainsi que « la conception riemannienne ne néglige pas l'existence d'un élément *a priori* dans la structure de l'espace ; seulement, *la frontière entre l'a priori et l'a posteriori se trouve déplacée* ». Nous ne pouvons ici analyser tout ce que cela implique de « déplacement » par rapport au kantisme. Que tire de son côté Bachelard du « bougé » riemannien opéré par la relation différentielle de la loi d'action de contact ?

« La loi générale [de Coulomb] cesse donc d'être *a priori* [...]. On objectera que le général est tangent au particulier, que les cadres euclidiens sont une première simplification du donné infinitésimal lui-même. Mais un système de référence euclidien qu'on doit transporter de proche en proche d'une manière en somme non-euclidienne pour suivre la pseudo-généralité a-t-il vraiment la valeur euclidienne qu'on lui attribue ? La description sur place pourrait peut-être rentrer dans le cadre *euclidien en première approximation*. Mais il s'agit d'une description essentiellement *relative*, c'est-à-dire qui doit servir ailleurs et en un autre temps, qui doit lier par la pensée les états successifs

18. WEYL, 1918, p. 384 et 411.

et prochains du réel. Le mouvement descriptif doit donc se plier sous la courbure de l'Univers. Il en résultera une géométrie *a posteriori*, post-expérimentale, qui n'aura pas la valeur de prévision qu'on attribuait à une géométrie informatrice *a priori*, mais qui, *en échange*, sera apte à enregistrer le discontinu du devenir et de l'être [...]. La matière nous apparaît donc sous la forme d'une contingence en quelque sorte feuilletée¹⁹. »

Cet écho potentialisant à Weyl peut être qualifié comme la marque typique (et topique) d'un grand pouvoir d'« oscultation » philosophique, répondant aux « méthodes d'oscultation utilisées par le mathématicien » comme il le formulera dans sa conclusion. Ce qu'il « osculte » ici du rapport Riemann-Weyl, « c'est l'allure rectificative d'une pensée. Rien de plus clair et de plus captivant que cette *jonction* de l'ancien et du nouveau. La rectification est une réalité, mieux, c'est la véritable réalité épistémologique (la « contrainte » de Weyl), puisque c'est la pensée dans son acte, dans son dynamisme profond²⁰. »

Il faudrait trouver le temps d'analyser à nouveau la présence récurrente de Weyl dans *La Valeur inductive de la relativité* de 1929. Il s'agit ici du Weyl de la constitution d'une « véritable géométrie du caractère électrique [...], en liaison réciproque avec les caractères purement mécaniques de la Relativité générale » : c'est ce qu'il qualifie de « fusion de Weyl », comme tentative d'assimilation de l'électrique au dynamique. Il en tire à nouveau une leçon pour l'épistémologie : « La méthode de M. Weyl consiste essentiellement dans un élargissement de l'axiomatique. » Puis, solidairement, Bachelard pointe la « géométrie des jauges » :

« Avant les travaux de M. Weyl, [...] l'unité de longueur gardait la même valeur après un cycle fermé de transformations dans l'espace. Qu'on abandonne maintenant le postulat de l'intégrabilité de la longueur, et dans la pangéométrie ainsi constituée ("la géométrie des jauges") on se rendra compte que le champ électromagnétique est entièrement définissable *par les moyens algébriques*²¹. »

Conscient des difficultés soulevées, il n'en conclut pas moins « que le sens de la tentative de M. Weyl *doit retenir l'attention de l'épistémologue*. Cette tentative est propre, croyons-nous, à préparer cette conclusion : l'unité mathématique qui se constitue dans une axiomatique de la Physique commande entièrement l'unité du phénomène²² ». C'est pour défendre plus loin Hermann Weyl dans un débat avec Stanislaw Zaremba qui porte précisément sur « l'axiomatisation » et sur la définition d'un corps rigide en relativité générale. Il insiste positivement sur la définition « toute en virtualité » de Weyl. Enfin il aborde la dialectique « généralités/spécifications » dans sa théorie unitaire, pour terminer avec la « soudure axiomatique » de Weyl, « axiomatique » dans laquelle il a découvert « la trace des potentiels électriques » (à nouveau sa théorie de jauge). La restitution de cette économie « en partage » est essentielle, mais difficile, faute de place, à exposer ici.

19. BACHELARD, 1928a, p. 283.

20. BACHELARD, 1928a, p. 300.

21. BACHELARD, 1929, p. 136-137.

22. BACHELARD, 1929, p. 137.

II. – WOLFGANG PAULI OU LA « SCHOLA QUANTORUM »

Impossible de dire quelques mots sur la place de Pauli dans les écrits de Bachelard sans rappeler qu'il était l'homme des boutades et du *Witz*, c'est-à-dire quelqu'un de profondément « spirituel ». Lors d'un séminaire, John von Neumann démontrait un théorème au tableau ; Pauli l'apostrophe : « Si faire de la physique, c'était démontrer des théorèmes, tu serais un grand physicien. » C'est ainsi qu'il terrorisait un peu tous les autres physiciens de par le monde, y compris Louis de Broglie ou Werner Heisenberg qui fuyaient littéralement les colloques où il était présent.

II. 1. – Pauli en « principe »

Pour Bachelard, Pauli fait partie des hommes de l'« Ontologie provisoire », c'est-à-dire de l'ontologie des êtres physiques de notre temps. C'est en 1932 que Pauli fait son entrée sur la scène... des « spectres » précisément ! Le chapitre XII du livre III du *Pluralisme cohérent de la chimie moderne* – intitulé « Du repérage à la mesure. De la mesure à l'harmonie mathématique dans les problèmes de l'analyse spectrale » – constitue le seuil obligé pour une compréhension de l'apport décisif du « Principe de Pauli », exposé au chapitre XIII, intitulé « La description quantique ». Bachelard prévient : « La découverte fondamentale de la spectroscopie théorique, c'est le fait que la fréquence d'une raie se présente mathématiquement comme une *différence de deux termes*. On ne saurait trop méditer ce théorème²³. » En effet, en s'en tenant à une philosophie de la science issue des travaux d'Augustin Jean Fresnel et de James Clerk Maxwell, « on ne verrait pas comment on a pu éprouver le besoin de former une substructure de la notion de fréquence²⁴ ». C'est une « symétrie algébrique » qui confirme l'intuition géniale de Ritz : la fréquence n'est pas le concept fondamental puisque c'est une notion que l'on peut construire à partir de termes que l'on reconnaîtra par la suite inscrits dans la nature des choses. Et le nombre de termes nécessaires est plus petit que celui des raies.

« [Or] tout procédé qui restreint les moyens d'explication nous met sur la voie de la rationalisation de l'expérience. Là encore, nous voyons le pluralisme du phénomène s'ordonner en tendant systématiquement vers son minimum. Cette économie systématique – bien éloignée au fond de l'économie occasionnelle et pragmatique prônée par Mach – consacre la notion de terme qui apparaît ainsi, dans la spectroscopie contemporaine, comme une notion à la fois primordiale et organique. [...] C'est avec des termes qu'on construira la notion dérivée de fréquence si longtemps tenue comme une notion quasi immédiate. Ce sont les termes que l'on devra éclairer par des schémas. C'est à fonder leur réalité que s'occupera toute une génération de physiciens²⁵. »

Cela passera par la « construction de Bohr » (incomplète) et par la « rectification (relativiste) de Sommerfeld » : c'est le passage des termes de Balmer aux termes de Rydberg.

23. BACHELARD, 1973, p. 202.

24. BACHELARD, 1973, p. 202.

25. BACHELARD, 1973, p. 204-205.

Sur les traces du « spectre », Pauli va apparaître comme le grand organisateur. Il va en quelque sorte mettre en cohérence le champ. Avec la découverte du principe portant son nom, c'est un système de description arithmétique qui s'est imposé peu à peu à la chimie moderne. Cette description générale est coordonnée par un principe nouveau, le principe de Pauli, « qui vient soudain éclairer d'une *lumière rationnelle* le tableau des substances élémentaires. Avec ce principe de Pauli s'achèvera *la cohérence arithmétique du divers*²⁶ ». Et c'est d'emblée dans le cadre de la « *Schola quantorum* » et d'une « arithmétique quantique » que Bachelard inscrit son action. C'est effectivement vers une pensée « en tableau », et par une sommation résumant des formations en carrés, que l'on va faire tendre la formule de Bohr qui condense les principes de quantification relative aux électrons. Une énumération cardinale des quanta est mise en rapport étroit avec la numération ordinale des raies du spectre : « On voit bien, comme le fait remarquer M. Eugène Bloch (*L'ancienne et la nouvelle théorie des quanta*), que l'arithmétique quantique «peut fournir un fil directeur pour l'interprétation théorique de la formation du tableau [couches électroniques et nombre maximal d'électrons]»²⁷. »

Trois leçons bachelardiennes sont ici directement tirées du travail de Pauli :

1. La nécessité et l'urgence de construire une métaphysique quantique de type « non-réaliste » (au sens des « philosophies du non ») :

« On pourrait [...] objecter que la règle de Bohr garde un certain arbitraire et qu'elle retrouve d'une manière *factice* la correspondance du nombre des électrons avec le nombre des éléments dans les diverses périodes ? On ne voit pas bien par quels caractères l'électron fixe les quanta. Mais c'est là encore *la fausse idée du réaliste* de la qualification *directe* de l'électron par les quanta qui amène cette objection. *Nous souffrons d'un déficit de la pensée métaphysique*. En effet, il paraît bien nous manquer encore un type de pensée qui expliquerait, par une sorte d'attribution de groupe, le partage des quanta sur les différents électrons. Autrement dit, la pluralité des électrons et la pluralité des quanta devraient être mises en correspondance immédiate. *C'est dans cette voie qu'on pourrait peut-être interpréter directement la règle de Pauli*²⁸. »

2. Le renforcement des « rationalisation[s] du possible » :

« Cette règle [de Pauli] convenablement interprétée donne la formule limitative de Bohr. Elle mesure le réel en fixant l'impossible. Cette règle ne s'éclairera pas en méditant la nature particulière de l'électron ; au contraire elle s'affirmera *mathématiquement* par des considérations de convenance générale, *dans une pensée qui enserme et systématise une pluralité de conditions*.

« Une fois de plus ; la rationalisation du possible *a précédé et préparé* la rationalisation du réel²⁹. »

Il s'agit ici du prolongement dans la mécanique quantique des conclusions antérieures de l'analyse fine de la « gravitation relativiste », tout à la fois un antisubstantialisme et

26. BACHELARD, 1973, p. 215.

27. BACHELARD, 1973, p. 220.

28. BACHELARD, 1973, p. 220.

29. BACHELARD, 1973, p. 220-221.

une puissance rationnellement réalisante d'un préparatif des possibles comme « harmonisation mathématique » par mise en place de dispositifs virtuels³⁰.

3. Enfin, l'ouverture sur le « Problème philosophique de l'harmonie substantielle » (titre de la conclusion de l'ouvrage) :

« Il nous semble qu'on pourrait, à certains titres, considérer *le raisonnement expérimental* qui se confirme par le moyen d'une harmonie [rationnelle et non plus factuelle] comme *une extension* du raisonnement inductif. Il s'agit en effet d'une extension qui *franchit les classes*, qui postule d'une qualité à une autre qualité, qui se confie à *une homographie* des substances. Différents éléments, intégrés dans une série, reçoivent de cette série *comme le reflet d'une unité idéale*. "La sérialité peut être considérée comme un cas particulier de la continuité [...], au point qu'on pourrait parler de la continuité d'un discontinu bien ordonné. Ici, comme en mathématiques, la loi de la série prime la structure des éléments, ou du moins, on ne retient de la structure des éléments que ce qui éclaire la construction d'une loi générale facilitant les inductions les plus audacieuses. On peut dire vraiment que la pensée inductive passe du phénomène au noumène ; autrement dit encore, on a l'impression d'avoir trouvé la raison de l'induction" (Voir Ernst Cassirer, *Substanzbegriff und Funktionsbegriff*, p. 290 et 292.) [...] De même qu'on a défini une induction complète, on pourrait peut-être parler ici d'une *construction complète*³¹. »

Ici, le déchiffrement « rationnel » du principe de Pauli, par le biais de sa « substitution épistémologique » d'une harmonie des substances comme raisonnement à une harmonie comme « fait », vient encore potentialiser les embrayeurs catégoriaux d'« inductivité », de « constructivité » et de « nouménologie » (de type non-kantien) élaborés précédemment dans le champ de la relativité générale ou au travers des analyses de la « connaissance approchée ».

Deux ans plus tard, en 1934, la présence pressante de Pauli se fait littéralement « spectro-scopique » : c'est l'heure du *Nouvel Esprit scientifique*. Bachelard y radicalise la « coupure » quantique, et par là même précise et enrichit les conséquences pour la pensée philosophique :

« Au lieu d'attacher directement à l'électron des propriétés et des forces, on va lui attacher des nombres quantiques et, d'après la répartition de ces nombres, on déduira la répartition des places des électrons dans l'atome et dans la molécule. Qu'on saisisse bien la subtilisation soudaine du réalisme. Ici, *le nombre devient un attribut, un prédicat de la substance*. Quatre nombre quantiques suffiront à donner l'individualité à l'électron. Cette individualité sera d'ailleurs l'objet d'une sorte de respect mathématique [...]. D'un électron à un autre, il faut qu'il y ait au moins une différence dans un nombre quantique. C'est grâce à cette différenciation numérale que l'électron aura un rôle bien fixé dans l'atome. Tel est le sens philosophique du principe d'exclusion de Pauli. On le voit, ce principe va à l'encontre de toute attribution substantialiste, inscrite en profondeur dans la substance, puisqu'il s'agit d'une sorte d'attribution en extension³². »

30. Pour une délimitation des rapports entre « harmonisation mathématique » et dispositifs virtuels, et pour une nécessaire rectification des interprétations dominantes des concepts bachelardiens d'« induction » et d'« inductivité », voir ALUNNI, 1999.

31. BACHELARD, 1973, p. 227-230.

32. BACHELARD, 1934, p. 79 (souligné par l'auteur).

Mais le principe de Pauli doit s'étendre, au-delà de la molécule, « à toute association matérielle » :

« [...] on est amené à une sorte de *synonymie* entre l'organisation matérielle et le *principe d'individuation quantique* des éléments constituants. Dès qu'il y a organisation effective, il y a lieu de faire jouer le principe de Pauli. Philosophiquement parlant, c'est l'exclusion systématique du *même*, c'est l'appel à l'*autre*³³. »

La caractérisation catégoriale du corps chimique va dès lors trouver un autre statut :

« Il y a là une sorte de passage subreptice du *corps chimique* au *corps arithmétique*, ce dernier terme étant pris dans son sens mathématique technique. Un corps chimique est ainsi un *corpus* de lois, une énumération de caractères numériques³⁴. »

Les affinités avec la future approche lautmanienne nous paraissent ici tout particulièrement « électives » : « Tel est le premier effort de subtilisation qui marque *le passage* du réalisme matérialiste au réalisme mathématique³⁵. »

Enfin, dernière grande leçon pour le philosophe de la chimie moderne, et nouvelle tâche d'approfondissement de la radicalité quantique :

« L'attribution des quatre nombres quantiques à l'électron doit encore être davantage désusubstantialisée. Il faut maintenant comprendre en effet que cette attribution est d'essence probabilitaire, car on sent plus ou moins nettement le besoin de fonder le principe d'exclusion de Pauli à partir du calcul des probabilités [...]. Peu à peu, l'arithmétique quantique devient une arithmétique de la probabilité [...]³⁶. »

En fait, c'est « l'abîme métaphysique » entre l'esprit et le monde extérieur qui apparaît moins large :

« On peut même concevoir un véritable déplacement du réel, un épurement du réalisme, une sublimation métaphysique de la matière. La réalité se transforme d'abord en réalisme mathématique, puis le réalisme mathématique vient se dissoudre dans une sorte de réalisme des probabilités quantiques [...]. Exprimons donc cette double suprématie du nombre sur la chose et du probable sur le nombre par une formule polémique : *la substance chimique n'est que l'ombre d'un nombre*³⁷. »

C'est ce qu'il convient de qualifier de retour du spectre dans sa revenance philosophique. Telles furent les trois étapes discursives et principielles de la *Schola quantum*.

33. BACHELARD, 1934, p. 80.

34. BACHELARD, 1934, p. 80.

35. BACHELARD, 1934, p. 80.

36. BACHELARD, 1934, p. 81.

37. BACHELARD, 1934, p. 81.

II. 2. – Pauli démontré par le « postulat de non-analyse³⁸ »

L'année de la thèse de Lautman, en 1937, Bachelard prolonge encore le geste « initiatique » de Pauli, au cœur même d'un ouvrage que nous considérons comme central pour une compréhension fine de la mécanique quantique : *L'Expérience de l'espace dans la physique contemporaine*. L'enjeu de l'ouvrage consiste à comprendre catégoriquement (au sens également d'un « impératif catégorique » post-kantien !) – puis à mettre en œuvre dans la pensée – les inégalités de Heisenberg : il s'agit pour Bachelard de faire l'expérience effective (comprenons, une « expérience de pensée » permanente) du nouvel espace quantique. C'est le sens grammatical du titre.

« *Pénétrons-nous bien de cette pensée* : ce qui rend inadéquate la description du domaine atomique en termes d'espace et de temps usuels, c'est que nous négligeons la *corrélation* des incertitudes géométriques et dynamiques. Négliger cette corrélation, c'est accepter le *postulat cartésien* d'une analyse spatiale exhaustive susceptible d'atteindre une localisation ponctuelle [...]. Nous appelons *postulat de non-analyse* le postulat fondamental de cette physique non-cartésienne³⁹. »

Trois ans plus tard, Bachelard affine encore sa définition :

« Nous avons exploité sous le nom de *postulat de non-analyse* le principe de Heisenberg dont la fonction généralisée revient à interdire la séparation des qualités spatiales et des qualités dynamiques dans la détermination du micro-objet. D'accord avec ce principe, le micro-objet se présente alors comme un objet *bispécifié*. Corrélativement, la méditation d'une telle *bispécification* nous fait comprendre que l'objet qu'on localise statiquement dans l'intuition ordinaire est mal spécifié [pour une connaissance de deuxième approximation]. Autrement dit encore, sa spécification toute locale est une mutilation de la bispécification désormais indispensable pour organiser la microphysique [...]. Autrement dit, *l'espace de l'intuition ordinaire où se trouvent les objets n'est qu'une dégénérescence de l'espace fonctionnel où les phénomènes se produisent*⁴⁰. »

Suivant maintenant l'exposé de Frederick Alexander Lindemann, *The Significance of the quantum theory*⁴¹ Bachelard annonce une « extension » du principe d'exclusion : « Nous allons montrer [...] que l'application du principe de Pauli découle nécessairement du postulat de non-analyse. Cette démonstration apportera une véritable *cohérence* au pluralisme quantique⁴². » Suit une démonstration rigoureuse qui s'avère fondatrice, sur

38. Pour une définition précise de ce concept fondamental de « non-analyticité », voir BACHELARD, 1940, le chapitre intitulé « Les connexions spatiales élémentaires. La non-analyticité ». Pour une reconstruction de sa postérité dans les théories physiques actuelles (aux côtés d'Einstein et de Feynman), voir ALUNNI, 2001.

39. BACHELARD, 1937, p. 42.

40. BACHELARD, 1940, p. 109. Sur les philosophèmes mathématiques bachelardiens corrélatifs tels que les concepts de « bicertitude », « diphilosophisme », « biréflexion », « corationalisme et application conforme », voir les très belles analyses de PARROCHIA, 1997, en particulier « L'interrogation philosophique », « Le mouvement épistémologique : du descriptif au normatif » (p. 45-50), et surtout « Géométrie de Cremona et rationalisme appliqué » (p. 50-55).

41. LINDEMANN, 1932.

42. BACHELARD, 1940, p. 61.

un cas simplifié (un ensemble d'électrons rapprochés et localisés sur un segment de droite D), du principe d'exclusion de Pauli⁴³. Quelle est la conséquence spéculative immédiate et rationnelle de cette démonstration ?

« Nous assistons [...] à la *naissance d'une arithmétique ordinale* qui n'a plus tout à fait les mêmes propriétés que l'arithmétique cardinale ordinaire. Cette arithmétique ordinale désigne les objets comme foncièrement différents du seul fait qu'ils ne se présentent pas dans des expériences *identiques* [...]. Pour nous, l'électron n'est qu'un résumé d'expériences [...]. Le sens de l'exploration nous paraît [...] indéniable : il faut *aller de la méthode à l'être*, à contre-courant de l'instruction réaliste⁴⁴. »

On retrouve à nouveau l'idée d'une sorte d'ontologie « induite » et provisoire.

II. 3. – Pauli et sa « particule métaphysique »

C'est en 1951, avec *L'Activité rationaliste de la physique contemporaine* que se clôturent les retours, par voie de citations et « spectraux », de la figure de Pauli, et cette fois avec l'arrivée d'un « fantôme ».

Rappelons un point d'histoire. Dès 1930, Hans Bethe et Richard Becker bombardent du béryllium avec des particules alpha (déjà identifiées par Ernest Rutherford), issues du polonium, et découvrent qu'il en sort un rayonnement neutre très énergétique. Deux ans après, Frédéric Joliot et Irène Curie (dont on vient également de fêter le centenaire) font à nouveau l'expérience et sont en mesure de préciser que cette radiation est formée de particules neutres capables de chasser des protons des noyaux de la paraffine. La même année (en 1932) James Chadwick identifiait ces particules neutres comme étant pratiquement identiques au proton, et les appela neutrons, en souvenir de Rutherford qui en avait supposé l'existence sans les découvrir.

Puis, on identifia protons et neutrons comme deux états différents d'une même particule, le nucléon, qui se manifestait tantôt avec une charge positive (le proton), tantôt avec une absence de charge (le neutron). Sa grande caractéristique, nouvelle pour l'époque, était d'être instable. Cette hypothèse, due à Chadwick, fut proposée dès 1935, mais prouvée seulement en 1948 par George Davis Snell et précisée en 1950 par Robson. C'est alors que l'on put l'identifier avec la désintégration β des noyaux, découverte en 1900, et considérer qu'elle était due à une interaction (différente de l'électromagnétisme) dont Enrico Fermi avait jeté les bases en 1934. Or, entre-temps, Pauli examinait la dynamique de la désintégration β et constatait que ni l'énergie, ni le moment cinétique n'étaient conservés ; il était alors pour lui probable qu'une *particule hypothétique neutre* et sans masse devait emporter avec elle, après la réaction, les quantités manquantes. C'était là l'hypothèse théorique du neutrino ν , qui ne sera découvert que vingt et un ans plus tard, en 1956, par Frederick Reines et Clyde Cowan.

En 1951, Bachelard repose donc à nouveaux frais son programme de rectification approximaliste et métaphysique :

43. BACHELARD, 1940, p. 60-65.

44. BACHELARD, 1940, p. 65-66.

« Ce corpuscule nous paraît fort propre pour *sensibiliser* les nuances philosophiques du rationalisme appliqué. À son propos, en effet, on peut poser bien des questions *philosophiques* : le neutrino correspond-il à une simple hypothèse de travail ? Est-ce une entité commode, une convention utile à l'expression des faits ? Si c'est une convention, pourquoi est-elle si généralement admise ? Ou bien, peut-on espérer qu'un type nouveau d'expériences, qu'une sensibilité accrue dans les appareils de détection apporteront des preuves de sa réalité ? [...] Le philosophe doit trouver là de véritables leçons pour l'esprit de finesse métaphysique⁴⁵. »

Pauli se trouve à nouveau au centre d'un enrichissement, d'une complexification de la pensée philosophique – prolongement intensifiant d'un même geste, inauguré dans les protocoles de son principe, et poursuivi ici :

« La philosophie corpusculaire [prend] alors une grande variété suivant qu'on l'abordera par l'avenue des théories ou par l'examen des expériences [...]. Le corpuscule nous semble ainsi *l'être même d'un rationalisme appliqué*. On ne peut comprendre la philosophie corpusculaire sans une philosophie essentiellement transactionnelle, sans une philosophie à deux mouvements⁴⁶. »

Pauli aura permis « de préciser comment une particule qui n'est pas encore *physique*, une particule que le réaliste doit tenir pour *métaphysique* est cependant une particule indispensable à l'organisation rationnelle de la pensée expérimentale⁴⁷ ». Pauli est désormais l'un des grands « constructeurs » de la mécanique quantique, et il participera encore à la « traduction de la notion de spin dans une organisation d'opérateurs⁴⁸ ». Sa mécanique s'ouvrira « en recommençant dans un *autre algébrisme*, dans un algébrisme qui va, cette fois, à la recherche de sa réalité⁴⁹ ». Chimiste quantique, alchimiste classique, il aura participé à « ouvrir un rationalisme multiple, au-delà du rationalisme de l'identité⁵⁰ ».

III. – GUSTAVE JUVET : DES « STRUCTURES » À LA « GÉOMÉTRODYNAMIQUE »

Comparé à ses deux collègues de l'ETH, Gustave Juvet (1896-1936) fait vraiment figure d'inconnu. Montrons ici simplement l'aberration d'une situation qui ne saurait se justifier historiquement, pas plus au niveau scientifique qu'au niveau philosophique.

« Inconnu », mais encore ?

III. 1. – Sur le plan scientifique

Rappelons trois points, gradués en fonction de la difficulté d'accès toute relative de la mémoire collective de nos collègues physiciens et mathématiciens.

45. BACHELARD, 1951, p. 118.

46. BACHELARD, 1951, p. 127.

47. BACHELARD, 1951, p. 118.

48. BACHELARD, 1951, p. 178.

49. BACHELARD, 1951, p. 176.

50. BACHELARD, 1953, p. 224.

1. Voici ce que l'on trouve dans l'ouvrage *canonique*, lu par des générations entières d'ingénieurs et de physiciens relativistes :

« Ces dernières années ont été publiés des traités généraux consacrés au calcul absolu [ce que l'on appelle aujourd'hui le *calcul tensoriel*] : par exemple, ceux de Juvet (*Introduction au calcul tensoriel et au calcul différentiel absolu*, Blanchard, Paris, 1922), Marais (*Introduction géométrique à l'étude de la relativité*, Gauthier-Villars, Paris, 1923) et Galbrun (*Introduction à la théorie de la relativité. Calcul différentiel absolu et géométrie*, Gauthier-Villars, Paris, 1923). [...] Par exemple [concernant la découverte et le prolongement, indépendants du traité fondateur de Gregorio Ricci et Tullio Levi-Civita paru en français dans les *Mathematik Annalen* en 1901, et ce sur la base d'une dérivation des schèmes tensoriels à partir de la notion fondamentale de "parallélisme"], la définition d'un tenseur et nombre d'anticipations algébriques de résultats visant à simplifier les démonstrations, se trouvent chez Weyl, Laue, et Marais, chacun d'eux établissant, à l'instar d'Eddington, un lien plus ou moins étroit entre différentiation covariante et parallélisme. Une discussion méthodique et complète de ce dernier point est également donnée par Juvet et Galbrun⁵¹. »

2. Qui voudrait considérer, même distraitemment, les théories physico-mathématiques les plus actuelles ne manquerait pas de tomber sur des champs thématiques impliquant ce que les physiciens appellent les « théories pentadimensionnelles de Kaluza-Klein » : de la topologie de Yang-Mills en théorie quantique des champs, aux théories des « super-cordes » où les physiciens ont également appliqué les principes de la théorie de Kaluza-Klein, en passant par les théories de jauge ou des « fermions dynamiques de Kaluza-Klein en dimensions supplémentaires ». Cette double signature (il ne s'agit pas encore là d'un véritable « objet » physico-mathématique « exotique ») renvoie tout simplement à une théorie proposée dès 1919 par deux physiciens concernant un problème non résolu par Einstein lui-même. Bien que les équations de la relativité générale telle que formulée par Einstein donnent une description géométrique de la gravitation, elles ne parviennent pas à fournir une description géométrique pour l'électromagnétisme. Kaluza et Klein eurent alors l'idée de rajouter une cinquième dimension à l'espace-temps et, de façon très surprenante, ils aboutissent à un résultat satisfaisant. Alors que cette théorie a pu aujourd'hui renaître de ses cendres, que trouve-t-on sur cette question dans la littérature (peu prolixe) de l'époque ?

De Ferdinand Gonseth et Gustave Juvet, pour les années 1927 et 1928, nous pouvons citer : « Les équations de l'électromagnétisme et l'équation de M. Schrödinger dans l'Univers à cinq dimensions⁵² » ; « Sur la métrique de l'espace à cinq dimensions de l'électromagnétisme et de la gravitation⁵³ » ; « Sur la relativité à cinq dimensions et sur une réinterprétation de l'équation de M. Schrödinger⁵⁴ ». L'éclaircissement de ce deuxième point devrait déjà contribuer à tirer Juvet de l'oubli.

51. LEVI-CIVITA, 1977, p. VIII-IX. Il s'agit de la préface à la première édition italienne de *The Absolute differential calculus*, parue à Rome en 1925 sous le titre *Lezioni di calcolo differenziale assoluto*.

52. GONSETH et JUVET, 1927a.

53. GONSETH et JUVET, 1927b.

54. GONSETH et JUVET, 1928.

3. Le troisième événement se révèle encore plus marquant, car il est véritablement pionnier. De 1930 à 1935, Juvet va consacrer une série d'articles à une autre question, extrêmement actuelle également, concernant un formalisme puissant appliqué à la physique. Il s'agit de l'expression (et de la condensation) des équations électromagnétiques de Maxwell dans une unique formule des algèbres de Clifford : « Opérateurs de Dirac et équations de Maxwell⁵⁵ » ; « Sur les nombres hypercomplexes de Clifford et leurs applications à l'analyse vectorielle ordinaire, à l'électromagnétisme et à la théorie de Dirac », en collaboration avec Schidlof⁵⁶ ; « Les nombres de Clifford et leur application à la physique mathématique⁵⁷ » ; « Les rotations de l'espace euclidien à quatre dimensions, leur expression au moyen des nombres de Clifford et leurs relations avec la théorie des spineurs⁵⁸ ».

Sur ce point, les grands spécialistes actuels du champ, tel Pertti Lounesto⁵⁹ du Helsinki Institute of Technology, référencient continûment ces travaux pionniers de Juvet. Nous allons voir d'ailleurs l'importance fondamentale qu'ils ont dans une généalogie de la philosophie des sciences : disons, par provision, que c'est un « nouveau » chantier à venir, tant pour le scientifique que pour le philosophe.

III. 2. – Du côté philosophique

La situation est de nos jours encore pire. Ce ne fut pas toujours le cas. Pour mémoire, et pour la pincée d'humour, évoquons le débat qui suivit l'exposé de Gaston Bachelard, le 25 mars 1950, devant la Société française de philosophie intitulé « De la nature du rationalisme⁶⁰ ». Jean Ullmo prit la parole pour dire qu'il se souvenait « d'un texte très intéressant de M. Juvet, un peu ancien maintenant » et Jean Beaufret, lui-même, intervint pour donner une leçon au conférencier : « Je vous rappelle, dit Beaufret, le livre de Juvet auquel faisait allusion Ullmo : c'est un de ceux qui m'ont le plus passionné il y a quelques années », – et Bachelard de répondre : « Il y a vingt ans ! »...

Il faut également se souvenir que Juvet est une référence pour Lautman, dans sa thèse : « Les schémas de genèse⁶¹ ». Le contexte devrait désormais nous rappeler quelque chose : « La réalité physique n'est donc pas indifférente à cette mathématique qui la décrit ; les constatations expérimentales appellent une mathématique dont elles imitent déjà le dessin [ici, renvoi à *La Structure des nouvelles théories physiques*, Paris, Alcan, 1933]⁶². »

Juvet est avant tout mobilisé par Bachelard, dans *Le Nouvel Esprit scientifique* de 1934, pour montrer, dans le cadre des relations des diverses géométries comme double processus d'une « déconcrétisation des notions de base et [...] de concrétisation des

55. JUVET, 1930.

56. JUVET et SHIDLOF, 1932.

57. JUVET, 1932.

58. JUVET, 1935.

59. Pertti Lounesto est mort noyé en Crète le 21 juin 2002. Rappelons ici trois de ses ouvrages fondamentaux : RIESZ, BOLINDER et LOUNESTO, dir., 1993 ; LOUNESTO, 1997 ; ABLAMOWICZ et LOUNESTO, dir., 1995.

60. BACHELARD, 1972, p. 45 sq.

61. LAUTMAN, 1977, p. 151, n. 62.

62. BACHELARD, 1928a, p. 147.

relations entre ces notions décolorées », la première de ces opérations : « En ce qui concerne le premier processus, référons-nous à des pages profondes que M. Juvet a écrites sur l'axiomatique⁶³. » C'est tout le chapitre premier, consacré à « La philosophie géométrique », qui suit pas à pas l'entreprise de Juvet. C'est sur son analyse de la place fondamentale de la notion de « groupe » en géométrie, et en particulier sur son importance pour la théorie physique moderne que porte l'attention du philosophe. Enfin Bachelard retiendra chez Juvet la dimension « structurale » de la science contemporaine. Cela se comprend aisément si l'on se souvient de l'intérêt soutenu et des analyses profondes de l'auteur de *l'Essai sur la connaissance approchée* sur le binôme Riemann-Weyl : c'est de cette ligne généalogique que l'on peut dessiner un spectre précis de ce qui commande la philosophie profonde de Juvet. Sa sensibilité à la « structure des nouvelles théories physiques » est nécessairement liée à son engagement pionnier dans les « algèbres de Clifford », et c'est ce qui fait son actualité fondamentale. Nous ne pouvons aborder ce point ici, mais Clifford, dès les années 1870, a développé une « théorie de l'espace-courbure-matière » comme version géométrique de la théorie physique du champ de Maxwell. Son importance, liée aussi aux idées de Maxwell, a été décisive pour les développements de la physique moderne. On peut montrer qu'il y a une analogie remarquable entre les idées exprimées par le fondateur de l'électromagnétisme et les idées de Clifford. C'est autour des années 1950 que Charles W. Misner et John A. Wheeler s'inspireront de cette analogie pour construire, dans le cadre de la relativité générale d'Einstein, une véritable synthèse des théories électromagnétiques de Maxwell et de l'espace-courbe de Clifford, via une géométrisation totale de la physique. Ce programme remonte à la construction d'une « pure géométrie infinitésimale » tentée dès 1918 par Weyl et donnera naissance à ce que Wheeler a baptisé en 1962 du nom de « géométrodynamique ». C'est dans cette grande tradition qu'il faudrait désormais inscrire le physicien Gustave Juvet, qui était aussi philosophe – en témoignent les minutes du « Club des Amis de la Nature » de Lausanne soulignant qu'il présente « un merveilleux travail sur le Triangle de Pascal et le binôme de M. Newton, travail fort personnel, suave, doux, coulant, qui eut le seul tort de ne pas être écouté par des affreux littéraires, sabots du Club [...] »⁶⁴.

IV. – CONCLUSION

Terminons par un souhait, le souhait « surréel » de Bachelard, qui sera également le nôtre :

« Nous voudrions en effet donner l'impression que c'est dans cette région du surrationalisme dialectique que "rêve" l'esprit scientifique. C'est ici, et non ailleurs, que prend naissance la rêverie anagogique, celle qui s'aventure en pensant, celle qui pense en s'aventurant, celle qui cherche une illumination de la pensée par la pensée, qui trouve une intuition subite dans les au-delà de la pensée instruite.

63. BACHELARD, 1934, p. 29-30.

64. 9 octobre 1913. « Quelques fragments de L'évolution créatrice de Bergson, contre les mécanistes » (lecture/séance n° 368).

« [...] La rêverie anagogique, dans son élan scientifique actuel, est, d'après nous, essentiellement mathématisante. Elle aspire à plus de mathématiques, à des fonctions mathématiques plus complexes, plus nombreuses. Quand on suit les efforts de la pensée contemporaine pour comprendre l'atome, on n'est pas loin de penser que le rôle fondamental de l'atome c'est d'obliger les hommes à faire des mathématiques. De la mathématique avant toute chose... Et pour cela préfère l'impair... Bref, l'art poétique de la Physique se fait avec des nombres, avec des groupes, avec des spins, en excluant les distributions monotones, les quanta répétés, sans que rien de ce qui fonctionne ne soit jamais arrêté. Quel poète viendra chanter ce panpythagorisme, cette arithmétique synthétique qui commence en donnant à tout être ses quatre quanta, son nombre de quatre chiffres, comme si le plus pauvre, le plus abstrait des électrons avait déjà nécessairement plus de mille visages [...]. L'atome est une société mathématique qui ne nous a pas encore dit son secret⁶⁵. »

Continuités référentielles qui participent à la puissance du continu de la pensée. Un seul Bachelard, mais un Bachelard « prismatique », chez qui le perspectivisme scientifique, épistémologique et métaphysique (on songe à Nietzsche) constitue l'unité différentielle d'une pensée en marche. Surprendre les sciences dans leurs approximations successives, voilà qui fait la surprise jubilatoire de la pensée.

Charles ALUNNI
(septembre 2000).

65. BACHELARD, 1940, p. 49-50.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- ABLAMOWICZ (Rafal) et LOUNESTO (Pertti), dir., 1995, *Clifford algebras and spinors structures. A special volume dedicated to the memory of Albert Crumeyrolle (1919-1992)*, Dordrecht, Kluwer Academic (Mathematics and its Applications, vol. CCCXXI).
- ALUNNI (Charles), 1999, « Relativités et puissances spectrales chez Gaston Bachelard », *Revue de synthèse*, n° spéc. : « Pensée des sciences », t. CXX, 1, janvier-mars, p. 73-110.
- ALUNNI (C.), 2001, « Pour une métaphorologie fractale », *Revue de synthèse*, n° spéc. : « Objets d'échelles », t. CXXII, 1, janvier-mars, p. 154-171.
- ALUNNI (Charles) et BRIAN (Éric), 2002, « La mémoire des gestes de science et ses enjeux », *Actes de la recherche en sciences sociales*, n° spéc. : « Science », 141-142, mars, p. 127-134.
- BACHELARD (Gaston), 1928a, *Essai sur la connaissance approchée*, Paris, Vrin.
- BACHELARD (G.), 1928b, *Étude sur l'évolution d'un problème de physique. La propagation thermique dans les solides*, Paris, Vrin.
- BACHELARD (G.), 1929, *La Valeur inductive de la relativité*, Paris, Vrin.
- BACHELARD (G.), 1934, *Le Nouvel Esprit scientifique*, Vendôme-Paris, Impr. Presses universitaires de France-Alcan.
- BACHELARD (G.), 1937, *L'Expérience de l'espace dans la physique contemporaine*, Paris, Presses universitaires de France.
- BACHELARD (G.), 1940, *La Philosophie du non. Essai d'une philosophie du nouvel esprit scientifique*, Paris, Presses universitaires de France.
- BACHELARD (G.), 1949, *Le Rationalisme appliqué*, Paris, Presses universitaires de France.
- BACHELARD (G.), 1951, *L'Activité rationaliste de la science contemporaine*, Paris, Presses universitaires de France.
- BACHELARD (G.), 1953, *Le Matérialisme rationnel*, Paris, Presses universitaires de France.
- BACHELARD (G.), 1970, *Études*, Paris, Vrin.
- BACHELARD (G.), 1972, *L'Engagement rationaliste*, Paris, Presses universitaires de France.
- BACHELARD (G.), 1973, *Le Pluralisme cohérent de la chimie moderne*, Paris, Vrin.
- CANGUILHEM (Georges), 1963, « Dialectique et philosophie du non chez Gaston Bachelard », *Revue internationale de philosophie*, 66, fasc. 4, p. 441-452.
- CANGUILHEM (G.), 1968, *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, ici 5^e éd. augmentée, Paris, Vrin, 1981.
- CASTELLANA (Mario), 1990, « Alle origini della "Nuova epistemologia". Il Congrès Descartes del 1937 », *Protagora*, 4^e sér., 17-18, p. 15-100.
- CONNES (Alain), LICHNEROWICZ (André), SCHÜTZENBERGER (Marc), 2000, *Triangle de pensée*, Paris, Odile Jacob.
- GONSETH (Ferdinand) et JUVET (Gustave), 1927a, « Les équations de l'électromagnétisme et l'équation de M. Schrödinger dans l'Univers à cinq dimensions », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, Paris, Académie des sciences, t. II, p. 535-538.
- GONSETH (F.) et JUVET (G.), 1927b, « Sur la métrique de l'espace à cinq dimensions de l'électromagnétisme et de la gravitation », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, Paris, Académie des sciences, t. II, p. 412-413.
- GONSETH (F.) et JUVET (G.), 1928, « Sur la relativité à cinq dimensions et sur une réinterprétation de l'équation de M. Schrödinger », *Helvetica Physica Acta*, 1, p. 421-436.

- JUVET (Gustave), 1930, « Opérateurs de Dirac et équations de Maxwell », in *Commentarii mathematici helvetici*, Bâle, Birkhäuser, vol. II, p. 225-235.
- JUVET (G.), 1932, « Les nombres de Clifford et leur application à la physique mathématique », in *Actes du Congrès international des mathématiciens de Zurich*, Bâle, Birkhäuser, p. 225-235.
- JUVET (G.), 1933, *La Structure des nouvelles théories physiques*, Paris, Alcan.
- JUVET (G.), 1935, « Les rotations de l'espace euclidien à quatre dimensions, leur expression au moyen des nombres de Clifford et leurs relations avec la théorie des spineurs », in *Commentarii mathematici helvetici*, Bâle, Birkhäuser, vol. VIII, p. 264-304.
- JUVET (Gustave) et SCHIDLOF (Arthur), 1932, « Sur les nombres hypercomplexes de Clifford et leurs applications à l'analyse vectorielle ordinaire, à l'électromagnétisme et à la théorie de Dirac », *Société neuchâteloise des sciences naturelles. Bulletin du centenaire*, Neuchâtel, Neuchâtel publications, vol. LVII, p. 127-147.
- LAUTMAN (Albert), 1977, *Essai sur l'unité des mathématiques et autres écrits*, Paris, 10/18.
- LEVI-CIVITA (Tullio), 1977, *The Absolute differential calculus*, New York, Dover.
- LINDEMANN (Frederick Alexander), 1932, *The Significance of the quantum theory*, Oxford, The Clarendon Press.
- LOUNESTO (Pertti), 1997, *Clifford algebras and spinors*, Cambridge, Cambridge University Press.
- PARROCHIA (Daniel), 1997, *Les Grandes Révolutions scientifiques du xx^e siècle*, Paris, Presses universitaires de France.
- RIESZ (Marcel), BOLINDER (E. Folke) et LOUNESTO (Pertti), dir., 1993, *Clifford numbers and spinors*, with Riesz's private lecture to E. Folke BOLINDER and a historical review by Pertti LOUNESTO, Dordrecht-Londres, Kluwer Academic (Fundamental Theories of Physics, vol. LIV).
- SCHOLZ (Erhard), 2001, *Hermann Weyl's Raum, Zeit, Materie and a general introduction to his scientific work*, Bâle, Birkhäuser.
- Travaux du IX^e Congrès international de philosophie (Congrès Descartes)*, 1937, éd. par Raymond BAYER et al., Paris, Hermann.
- WEYL (Hermann), 1918, « Reine Infinitesimalgeometrie », in *Mathematische Zeitschrift*, Berlin/Heidelberg, Lichtenstein, vol. II, p. 384-411.
- WEYL (Hermann), 1922, *Temps, espace, matière*, trad. de Gustave JUVET et Robert LEROY, Paris, Blanchard.