

Zeitschrift: Études de Lettres : revue de la Faculté des lettres de l'Université de Lausanne
Herausgeber: Université de Lausanne, Faculté des lettres
Band: - (1997)
Heft: 1-2

Artikel: Sur une "crise de l'intuition" dans la théorie de la relativité et de la mécanique quantique et la discussion cassirérienne sur la physique moderne
Autor: Stamatescu, Ion-Olimpiu
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-870407>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 09.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

SUR UNE « CRISE DE L'INTUITION » DANS LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ ET DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE ET LA DISCUSSION CASSIRÉRIENNE SUR LA PHYSIQUE MODERNE

Dans la physique moderne, l'intuition classique *a priori* et les concepts théoriques de l'espace-temps représentent des conditions d'objectivation contradictoires. Les arguments présentés ci-dessous suggèrent qu'une reconstruction des concepts théoriques non-classiques à partir d'une intuition classique serait artificielle et ne résoudrait pas cette contradiction. Cela signifie ou bien que l'intuition perd son caractère immuable et devient « historique », ou bien que le processus d'objectivation n'est pas basé sur des conditions absolues mais se sert de divers « instruments » en relativisant ceux-ci simultanément. L'analyse essaie de suivre la position d'Ernst Cassirer sur la question d'une « crise de l'intuition » et les conclusions qui s'ensuivent.

La « philosophie des formes symboliques » est un schème intégratif homogène. Cette conception peut avoir un fort appel pour un physicien qui, d'un côté serait immédiatement d'accord avec Helmholtz pour reconnaître que « Les perceptions par nos sens sont des signes pour notre conscience, notre entendement doit apprendre à comprendre la signification de ces signes¹ » et aussi qu'« une fois que nous avons appris à lire correctement ces symboles, grâce à eux, nous sommes capables d'arranger nos actions de façon à ce qu'elles aient du succès, c'est-à-dire que les perceptions attendues s'ensuivent² ». Ceci veut dire qu'on reconnaît immédiatement que toute activité de l'esprit, des perceptions jusqu'aux actions, est basée sur des symboles. Et d'autre part, le

1. « Die Sinnesempfindungen sind für unser Bewußtsein Zeichen, deren Bedeutung verstehen zu lernen, unserm Verstande überlassen ist ». Hermann VON HELMHOLTZ, *Handbuch der physiologische Optik*, III, Leipzig : Voss, 1867, p. 433 ; *PO* dans la suite ; toutes les traductions sont de l'auteur.

2. « Wenn wir jene Symbole richtig zu lesen gelernt haben, so sind wir imstande, mit ihrer Hilfe unsere Handlungen so einzurichten, daß dieselben den

même physicien voudrait bien avoir une vue intégrative de la réalité et de notre activité de compréhension, par exemple dans le sens de Peirce, qui après avoir défini le réel par son indépendance par rapport à la façon dont on le pense³ y trouve aussi les concepts parce que : « l'opinion humaine tend généralement à long terme vers une forme bien définie qui est la vérité⁴ ». Ainsi, « Cela signifie : considérer la Réalité comme le produit normal de l'activité de l'esprit et non pas comme une cause inconnue⁵ ». Par cela on renonce à la « chose en soi » et simultanément on est conduit à conclure que ce concept de réalité : « n'interdit pas, mais plutôt nous encourage à considérer les perceptions comme des signes des réalités⁶ ». Nous savons en effet trop bien, que nos expériences — les images des résultats des collisions dans nos expériences à l'aide des accélérateurs de particules, ou bien les spectrogrames des quasars — ne sont que des signes qui sont chargés du commencement d'une signification déterminée seulement dans le cadre des structures symboliques que sont nos théo-

gewünschten Erfolg haben, d.h. daß die erwarteten neuen Sinnesempfindungen eintreten. Eine andere Vergleichung zwischen den Vorstellungen und den Dingen gibt es nicht nur in der Wirklichkeit nicht — darüber sind alle Schulen einig —, sondern eine andere Art der Vergleichung ist gar nicht denkbar und hat gar keinen Sinn». *PO*, p. 18.

3. «Wo soll man das Reale, dasjenige, was unabhängig davon ist, wie wir es denken, finden ? Geben muß es so etwas, denn wir finden, daß unsere Meinungen einem Zwang unterworfen sind; es gibt daher etwas, das unser Denken beeinflusst und nicht von ihm geschaffen wurde. Zwar ist uns unmittelbar nichts gegenwärtig als unsere Gedanken. Diese Gedanken wurden jedoch von Sinnesempfindungen verursacht, und diese Sinnesempfindungen werden durch etwas außerhalb des Verstandes erzwungen. Dieses Etwas außerhalb des Verstandes, das direkt die Sinnesempfindung beeinflusst und durch die Sinnesempfindung das Denken, ist, weil es außerhalb des Verstandes ist, unabhängig davon, wie wir es denken, und ist, kurz, das Reale». Charles Sanders PEIRCE, *Schriften zur Pragmatismus und Pragmatizismus*, O. Appel Hrsg., Frankfurt/Main : Suhrkamp, 1991, p. 114 ; *SPP* dans la suite.

4. «Die menschliche Meinung tendiert im allgemeinen auf lange Sicht zu einer definiten Form hin, welche die Wahrheit ist». *SPP*, p. 115.

5. «Kurz, es heißt, die Realität als das normale Produkt der geistigen Tätigkeit zu betrachten und nicht als eine unerkennbare Ursache». *SPP*, p. 118. Il n'est pas essentiel ici qu'il s'agisse d'un «idéalisme objectif» ou d'une «épistémologie évolutive», car pour Peirce la culture est un fait naturel : c'est l'aspect intégratif homogène qui compte pour notre discussion.

6. «Keinesfalls verbieten [würde], sondern uns vielmehr dazu ermutigen [soll], die sinnlichen Erscheinungen nur als Zeichen der Realitäten zu betrachten». *SPP*, p. 117.

ries, dont nous avons créé nous-mêmes les symboles dans l'élaboration de ces théories et en relation avec les observations. Et d'autre part, nous sommes tentés de croire que dans le cadre de ces théories nous avons à faire, en quelque sorte, avec la réalité. Une attitude strictement positiviste n'a jamais eu un succès total chez les physiciens, comme toute attitude dogmatique d'ailleurs. Les symboles mêmes utilisés dans nos théories sont liés dans des schèmes : parfois leur dénomination est un *mnémon* (comme pour l'électron), parfois non (comme pour le quark), mais indépendamment de ça, leur introduction dans les théories n'est pas arbitraire ; ils occupent des positions privilégiées dans le schème mathématique comme dans celui interprétationnel. Le positivisme du physicien est plutôt un avertissement et non une résignation : on s'interdit de projeter ses concepts dans la réalité, mais non pas d'y chercher les causes de la stabilité de la dynamique des constructions théoriques et une restriction de l'arbitraire dans l'engendrement de celles-ci, des symboles eux-mêmes. Une consolidation purement apriorique de cette stabilité d'autre part, basée sur un dualisme absolu, s'est montrée trop rigide ; par contre, un dualisme instrumentaliste pourrait être conçu dans un modèle dynamique, qui resterait en fin de compte sur une vue intégrative.

Cassirer offre ici un schème unificateur précis. Selon lui, la réalité est ce que nous pouvons connaître dans le cadre de nos théories : « Nous ne lisons pas les lois “sur les objets” mais nous condensons les données empiriques que nous obtenons par les observations et les mesures dans des lois, et par là même dans des propositions objectives, et en dehors de celles-ci il n'en existe pour nous aucune réalité objective, que nous devrions rechercher et chercher⁷ ». Car l'« “Objectivité”, ou la “réalité” objective existe parce que et seulement tant que la “légalité” existe — pas inversement⁸ ». Comme pour Peirce, la « réalité objective » est, par suite, le produit de l'activité de l'esprit à être affecté (*affiziert*).

7. « Wir lesen nicht einfach die Gesetze “von den Gegenständen ab”, sondern wir verdichten die empirischen Daten, die uns durch Beobachtung und Messung zugänglich sind, zu Gesetzen und damit zu objektiven Aussagen, und außerhalb dieser gibt es für uns keine objektive Wirklichkeit, die wir erforschen und nach der wir zu suchen hätten ». Ernst CASSIRER, *Zur Modernen Physik*, Darmstadt : Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1987, p. 278 sq ; ZMP dans la suite.

8. « Es gibt “Gegenständlichkeit” oder objektive “Wirklichkeit”, weil und sofern es Gesetzmäßigkeit gibt — nicht umgekehrt ». ZMP, p. 278 sq.

Chaque théorie physique est construite comme une structure symbolique d'après les règles de « relation » et de « référence mutuelle » (*sich beziehen*) et c'est l'unité de la relation qui « domine l'ensemble de la connaissance, des simples reconnaissances par les sens jusqu'aux plus hautes conceptions de l'esprit, dans lesquelles celui-ci dépasse ce qui est donné et en allant au-delà de la "réalité" directe des choses il achève son royaume libre du "possible"⁹ ». C'est la rigueur de la structure des relations entre les constructions symboliques, s'exprimant dans la « fonction de la signification » (*Bedeutungsfunktion*), qui assure la solidité de la théorie.

Tous ces aspects sont très intéressants et invitent le physicien à un dialogue que Cassirer lui-même avait déjà ouvert, et d'une manière exceptionnellement compétente. On est tenté d'interpréter la position de Cassirer du point de vue positiviste, mais cette question me semble rester équivoque et je ne la poursuivrai pas ici. En effet, il n'y a pas de théorie — particulièrement en physique — sans structures relationnelles rigoureuses, ainsi on pourrait commencer par se demander quelles sont les bases de cette rigueur, du fait que certaines classes de phénomènes préfèrent certaines structures mathématiques. On est conduit alors, entre autres, à la question de l'intuition et de son statut apriorique. C'est cette question que je vais essayer de discuter ici. Je ne peux pas, naturellement, poursuivre ce dialogue au niveau philosophique, ce que j'essaierai de faire c'est de discuter les points de vue physiques liés au problème des intuitions d'espace et de temps dans le cadre de la physique théorique et en liaison avec l'analyse de Cassirer.

9. «An welchem Punkte der Erkenntnis wir die Frage auch einsetzen lassen, [...] ob wir die Anschauung oder das reine Denken, ob wir die sprachliche oder die logisch-mathematische Begriffsbildung befragen: immer finden wir in ihnen jenes "Eine im Vielen" wieder, das [...] nicht sowohl die Einheit der Gattung, unter welche die Arten und Individuen subsumiert werden, [ist] als vielmehr die Einheit der Beziehung, kraft deren ein Mannigfaltiges sich als innerlich zusammengehörig bestimmt. Diese Grundform der Beziehung [...] beherrscht die Gesamtheit des Erkennens vom einfachsten sinnlichen Wiederfinden und Wiedererkennen bis hinauf zu jenen höchsten Konzeptionen des Gedankens, in denen er alles Gegebene überschreitet, in denen er, über die bloße "Wirklichkeit" der Dinge hinausgehend, sein freies Reich des "Möglichen" errichtet. In ihr daher muß der "Begriff" begründet und verankert sein». Ernst CASSIRER, *Philosophie der symbolischen Formen*, III, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1990, p. 348 ; PSF dans la suite.

Si la « spatialité » et la « temporalité » peuvent être considérées comme des « règles de construction symbolique », l'espace et le temps sont, dans un schème homogène de la connaissance, eux-mêmes des constructions symboliques — bref, des symboles. Leur détermination est achevée dans chaque système symbolique, où ils trouvent leur place à l'aide de la « fonction de la signification » (*Bedeutungsfunktion*). À première vue, il semble qu'aucune contradiction ne pourrait apparaître entre la tendance ordinatrice générale (mais non-précisée) de situer les événements les uns par rapport aux autres (l'ordre du « simultané », l'ordre du *somewhere else*, etc. — et de même pour le temps), et la structure empiriquement déterminée de cette situation. Si cette démarche était une règle de jeu autorisée on pourrait, en suivant Helmholtz, accepter directement la construction kantienne interprétée comme une question de forme / contenu : « La leçon kantienne sur les formes *a priori* de l'intuition est une expression très réussie et claire de la situation ; mais ces formes doivent être dénuées de contenu et suffisamment libres pour pouvoir accueillir n'importe quel contenu qui pourrait se présenter dans la forme de perception correspondante »¹⁰.

Mais est-il possible de procéder de cette manière dans une théorie homogène de la réalité et du symbole sans simplifier complètement l'intuition, en la dégradant au point de la comprendre comme une vague tendance automatique, irréfléchie, quelque chose comme l'instinct ? — ainsi qu'en fin de compte on ne serait plus capable de définir son activité constructive dans le processus de symbolisation et on serait forcé de la situer en dehors de ce processus. Ce n'est sûrement pas ce que veut réaliser Cassirer. Car alors, comment est-ce que nous pourrions même parler de l'intuition ? Peut-être que nous formons des symboles instinctivement, mais nous ne les formons pas *à l'aide* de l'instinct : celui-ci est défini par sa fonction symbolique dans le cadre des théories biologiques où il a sa place comme un mécanisme du comportement. L'intuition, comme symbole, a sa place dans une théorie de

10. «Kants Lehre von den a priori gegebenen Formen der Anschauung ist ein sehr glücklicher und klarer Ausdruck des Sachverhältnisses ; aber diese Formen müssen inhaltsleer und frei genug sein, um jeden Inhalt, der überhaupt in die betreffende Form der Wahrnehmung eintreten kann, aufzunehmen». Hermann VON HELMHOLTZ, *Abhandlungen zur Philosophie und Geometrie*, Cuxhaven : Junghaus, 1987, p. 299.

la connaissance et par ce fait même est un élément de la réflexion et non pas du comportement.

Cela veut dire que nous ne pourrions pas parler du tout de l'intuition, si nous n'étions pas capables de la faire participer à la fonction de signification dans un système symbolique. Mais au cas où on veut l'y faire participer est-il possible de la laisser complètement structurée ? La position de Kant est claire sur ce point et il munit l'espace d'une structure précise, euclidienne, à trois dimensions : « L'espace n'est pas un concept empirique [...]. Car pour rapporter certaines sensations à quelque chose en dehors de moi-même, de sorte que je puisse me les imaginer comme en dehors et à côté l'une de l'autre, et par là non pas simplement différentes mais en différents lieux, la représentation de l'espace doit déjà servir de fondement [...]. L'espace est une représentation nécessaire *a priori* sur laquelle se fondent toutes les intuitions externes [...]. Sur cette nécessité *a priori* est fondue la sûreté apodictique des propositions géométriques fondamentales et la possibilité de leur construction apriorique. Si la représentation de l'espace était un concept acquis *a posteriori*, obtenu par l'expérience générale externe, les propositions fondamentales primaires de la détermination mathématique seraient seulement des perceptions. Elles auraient alors tout le hasard de la perception et il ne serait pas nécessaire, par exemple, qu'entre deux points il n'existe qu'une ligne droite, mais ce serait l'expérience qui nous le montrerait chaque fois. Ce qui est tiré de l'expérience a seulement une validité comparative, par induction. On pourrait ainsi dire, dans ce qu'on a observé jusqu'à présent, qu'on n'a pas trouvé d'espace à plus de trois dimensions¹¹ ». Cette introduction de l'espace assure la nécessité de la géométrie qui à son tour assure le caractère

11. « Der Raum ist kein empirischer Begriff [...]. Denn damit gewisse Empfindungen auf etwas außer mir bezogen werden [...] imgleichen damit ich sie als außer und neben einander, mithin nicht bloß verschieden, sondern als in verschiedenen Orten vorstellen könne, dazu muß die Vorstellung des Raumes schon zum Grunde liegen. [...] Der Raum ist eine notwendige Vorstellung, *a priori*, die allen äußeren Anschauungen zum Grunde liegt. [...] Auf diese Notwendigkeit *a priori* gründet die apodiktische Gewißheit aller geometrischen Grundsätze, und die Möglichkeit ihrer Konstruktion *a priori*. Wäre nämlich diese Vorstellung des Raumes ein *a posteriori* erworbener Begriff, der aus der allgemeinen äußeren Erfahrung geschöpft wäre, so würden die ersten Grundsätze der mathematischen Bestimmung nichts als Wahrnehmungen sein. Sie hätten also alle Zufälligkeit der Wahrnehmung, und es wäre eben nicht notwendig, daß zwischen zwei Punkten nur eine gerade Linie sei, sondern die Erfahrung würde es so

objectif des connaissances acquises dans les théories physiques qui toutes font appel à la géométrie¹².

Mais alors nous rencontrons des difficultés. En effet, il est difficile d'essayer de définir l'intuition de l'espace et du temps qui est active dans le système symbolique d'une théorie physique sans la structurer en accord avec la structure des significations *particulières* de ce système. Il est bien problématique de parler d'un espace et d'un temps « pré-théoriques » (mais bien structurés), participant au processus d'objectivation des théories physiques et d'un espace et d'un temps « empiriques », ou « physiques », définis dans ces théories mêmes et différents des premiers. Ce serait le cas, par exemple, dans les théories de la relativité, si l'on voulait retenir un caractère galiléen de « l'intuition » de l'espace-temps « pré-théorique » entrant dans le processus d'objectivation. En effet, ce sont les structures spatio-temporelles d'une théorie physique qui sont eux-mêmes, comme partie de la théorie, des conditions d'objectivation (*Bedingungen der Möglichkeit der Erfahrung*). On ne peut pas avoir des conditions d'objectivation incompatibles agissant simultanément dans les mêmes « objets » ! (Naturellement, il est possible de dire que nous « comprenons » un espace courbé en l'imaginant comme « plongé » dans un espace euclidien, ou en le construisant « pas à pas » à l'aide d'un espace « tangentiel » local euclidien. Dans le premier cas il faut nous

jederzeit lehren. Was von Erfahrung entlehnt ist, hat auch nur komparative Allgemeinheit, nämlich durch Induktion. Man würde also nur sagen können, so viel zur Zeit noch bemerkt worden, ist kein Raum gefunden worden, der mehr als drei Abmessungen hätte». Immanuel KANT, *Kritik der reinen Vernunft*, B 39.

12. Nous avons ici un point très important et nous allons le discuter un peu en détail, même en anticipant la discussion dans le texte. C'est par la géométrie que l'espace devient fonctionnel dans tout schème théorique. Pour Kant il est clair qu'assurer la solidité des schèmes théoriques à l'aide de l'intuition de l'espace demande l'unicité apodictique au niveau intermédiaire (de la géométrie). On pourrait argumenter que Kant ne connaissait pas les géométries non-euclidiennes, mais pour lui la question primordiale n'est pas celle plus faible d'une simple correspondance, mais celle plus forte de la détermination mutuelle unique et non-empirique (*a priori*) entre la structure de l'espace comme forme de l'intuition et la structure géométrique des théories physiques comme instrument d'objectivation. Toutefois, s'il n'y avait pas même une correspondance, une justification intuitive apriorique des structures spatio-temporelles des théories modernes sans considération de l'empirie deviendrait tout à fait artificielle. Un processus de transmutation continue des contraintes empiriques dans les structures relationnelles offre par contre un point de vue beaucoup plus naturel.

imaginer un espace euclidien d'une dimension supérieure, en contradiction avec son intuitivité supposée. Dans le deuxième cas, il s'agit encore plus clairement d'une construction, car cet espace « local » est seulement un outil, il ne peut être pensé en aucun sens comme étendu et généralement valable ; c'est un concept introduit par une construction infinitésimale, pas dissemblable de celle de Leibniz et de Newton quand ils expliquent le mouvement circulaire de la lune comme composé à chaque instant de deux mouvements linéaires : tangentiel et radial).

Tout cela semble suggérer que dans le cadre d'une « théorie homogène de la connaissance », comme celui donné par la philosophie de Cassirer, l'intuition de l'espace et du temps aurait un caractère hypothétique et serait sujet à la même variabilité et à la même historicité que toutes les autres structures symboliques. En effet, si d'une part Cassirer relève le principe de la causalité au niveau de la « légalité comme telle », la possibilité même de théoriser pour ainsi dire, il parle d'autre part d'une « crise de l'intuition » (*Krise der Anschauung*) quand il discute l'impossibilité de schématiser le principe de la causalité pour décrire des événements spatio-temporels dans la mécanique quantique. Est-ce que Cassirer concevrait la possibilité d'une intuition de l'espace-temps qui ne serait pas fixe mais suivrait le développement des structures théoriques ? Si tel était le cas, Cassirer se distancerait de Kant plus qu'il ne paraît vouloir l'admettre. Cela pose aussi des questions épistémologiques importantes et difficiles : rappelons-nous que Kant trouve la nécessité de postuler une base *a priori* immuable en réponse à Hume spécifiquement pour justifier la solidité de la connaissance. Est-ce qu'on peut renoncer à l'immuabilité de l'une sans mettre en danger la solidité de l'autre ? Est-ce que le processus historique est capable d'engendrer les structures stables que nous observons dans tous les domaines de la pensée humaine, en même temps qu'il apparaît aussi capable de produire une diversité extraordinaire au sein même de ces structures, les changeant d'une manière qui semble nécessaire, presque prédestinée ?

Je n'ai pas l'intention d'essayer d'approfondir ces problèmes ici. Notons seulement qu'une fois les deux hypothèses les plus simples contredites par la physique moderne, l'apriorisme dogmatique et le réalisme naïf, et si nous considérons une attitude positiviste « jeter le bébé avec l'eau de bain », toute alternative doit prendre son profil en ce rapportant à ces trois positions. Je me limiterai ici à discuter quelques questions d'ordre physiques et à re-

chercher dans la discussion cassirérienne l'élaboration de la « crise de l'intuition » dont nous avons parlé ci-dessus.

La physique théorique est une science hautement formalisée, ses structures symboliques résistant à la représentation par images. Parce que cette question est importante nous commençons par décrire la difficulté essentielle :

whatever we are allowed to imagine in science must be consistent with everything else we know: [...] the electric fields and the waves we talk about are not just some happy thoughts which we are free to make as we wish, but ideas which must be consistent with all the laws of physics we know¹³.

Notons la difficulté résidant dans les contraintes auxquelles sont soumis les « objets » dont nous parlons. Ces contraintes expriment dans un langage mathématique la logique interne de la théorie et c'est seulement à ce niveau que les structures symboliques de la physique se définissent. Ces contraintes lancent un défi formidable à l'interprétation. Si nous parlons, par exemple, d'un atome d'hydrogène, il est absolument faux de l'imaginer comme un système solaire en miniature : l'électron ne suit pas un cercle, mais sa localisation est décrite par une sphère. Les intuitions classiques correspondant à la particule, au mouvement, à l'onde ne sont pas des approximations que la mécanique quantique permet d'améliorer mais deviennent tout simplement contradictoires dans la mécanique quantique. Ou bien si nous parlons de deux événements tels qu'aucun d'eux n'aurait pu recevoir un rayon de lumière émit par l'autre, il n'y a absolument pas de possibilité de dire s'ils sont simultanés, si l'un d'eux suit ou s'il précède l'autre : cela dépend littéralement du point de vue — du système de référence de l'observation. Il n'en existe pas de simultanéité comme concept indépendant non-contradictoire. Nous voyons ainsi que les contraintes qui structurent les symboles de la physique sont fréquemment démunies de solutions intuitives.

En ce qui concerne la philosophie, la position des physiciens — parmi eux, pas le moindre, c'est-à-dire Einstein — est plutôt pragmatique. L'intelligibilité du monde une fois postulée, on

13. Richard P. FEYNMAN «Scientific imagination», in Richard P. Feynman, Robert B. Leighton and Matthews Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. II, Reading Massachusset : 1964.

poursuit une construction symbolique. À ce propos Hermann Weyl dit : « Dans les sciences naturelles les positions contraires du réalisme et de l'idéalisme ne désignent pas des principes méthodologiques opposés. Nous construisons ici un monde objectif, [...] »¹⁴ dans lequel deux principes sont actifs : l'un « réaliste », à savoir : « Une différence dans les perceptions que nous recevons est toujours basée sur une différence entre les conditions réelles¹⁵ » et l'autre « idéaliste » : « l'image objective du monde ne doit pas permettre une différence qui ne pourrait pas se manifester dans une différence des perceptions ; on n'accepte pas une existence qui serait principiellement exclue de la perception¹⁶ ». Ce monde objectif peut être représenté seulement par des symboles. Dans une théorie physique on peut entrevoir deux structures symboliques complémentaires : la structure axiomatique, qui est de nature mathématique et la structure interprétative, qui est de nature pragmatique / opérationnelle. La collaboration entre ces deux structures réalise la sémantique de la théorie, sa structure de significations.

Rappelons-nous pour commencer quelques faits physiques. Voyons premièrement la question de la théorie de la relativité spéciale.

« Pour un physicien, le concept existe si et seulement si on a la possibilité de déterminer dans un cas concret si le concept est applicable ou non¹⁷ » dit Einstein quand il s'apprête à détruire le concept pré-relativiste de simultanéité. En partant du postulat de la relativité galiléenne et du postulat de l'indépendance de la propagation de la lumière par rapport au mouvement de la source, il

14. « Innerhalb der Naturwissenschaft bezeichnen die weltanschaulichen Gegensätze von Realismus und Idealismus einander nicht widersprechende methodische Prinzipien. Wir konstruieren in ihr eine objektive Welt, [...] ». Hermann WEYL, *Philosophie der Mathematik und der Naturwissenschaften*, München : Oldenbourg, 1976, p. 84 ; *PMN* dans la suite.

15. « Eine Verschiedenheit der sich uns aufdrängenden Wahrnehmungen ist stets in einer Verschiedenheit der reellen Bedingungen fundiert ». *PMN*, p. 84.

16. « [...] das objektive Weltbild darf keine Verschiedenheiten zulassen, die nicht in Verschiedenheiten der Wahrnehmung sich kundgeben können ; ein prinzipiell der Wahrnehmung unzugängliches Sein wird nicht zugestanden ». *PMN*, p. 85.

17. « Der Begriff existiert für einen physiker nur dann, wenn die Möglichkeit gegeben ist im konkreten Falle herauszufinden, ob der Begriff zutrifft oder nicht ». Albert EINSTEIN, *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie — gemeinverständlich*, Vieweg : 1920, p. 13.

déduit, par des règles opérationnelles, qu'une interprétation consistante de la théorie définie par ces deux postulats est possible et implique de renoncer au concept de simultanéité classique. Ici le premier postulat (« les lois physiques sont les mêmes dans tous les systèmes référentiels en mouvement uniforme ») était déjà bien établi, dans la physique comme en effet aussi dans la philosophie naturelle (par exemple, Leibniz). Le deuxième postulat est en fait de nature empirique, même si l'on pourrait dire qu'il est suggéré par la théorie de l'électromagnétisme : cette théorie a aussi une base empirique et c'est l'expérience de Michelson-Morley (avec laquelle nous avons un exemple d'expérience cruciale négative) qui tranche en défaveur d'une hypothèse bien définie de l'éther. Ces deux postulats pris ensemble sont incompatibles avec un postulat fixant un temps universel (et par là aussi une simultanéité bien définie). Mais le postulat d'un temps universel n'a, en effet, pas de base empirique (ou logique) et il n'y a pas de raison de baser l'interprétation de la théorie sur ce postulat. « On a besoin d'une définition de la simultanéité qui offrirait aussi la méthode par laquelle on pourrait décider », par des expériences, si dans un cas concret deux événements sont simultanés ou non, dit Einstein dans le même texte et il poursuit : « Tant que cette exigence n'est pas satisfaite je [...] suis en proie à une illusion quand je crois pouvoir donner sens à un jugement de simultanéité¹⁸ ». On peut alors retourner la question et demander s'il en existe un schème d'interprétation compatible avec l'ensemble des deux premiers postulats. C'est ce fait qu'Einstein discute dans la citation donnée ci-dessus. Ce schème, décrit en termes d'horloges, etc. existe et remplace la simultanéité classique par un concept nouveau qui, en fait, contredit celle-ci. Par cela même le concept classique du temps est renouvelé. Temps et espace ne sont plus des entités indépendantes, des éléments indépendants de la structure symbo-

18. «Es bedarf also einer solchen Definition der Gleichzeitigkeit, daß diese Definition die Methode an der Hand gibt, nach welcher im vorliegenden Falle aus Experimenten entschieden werden kann, ob beide Blitzschläge gleichzeitig erfolgt sind oder nicht. Solange dies Forderung nicht erfüllt ist, gebe ich mich als Physiker (allerdings auch als Nichtphysiker!) einer Täuschung hin, wenn ich glaube, mit der Aussage der Gleichzeitigkeit einen Sinn verbinden zu können. (Bevor du mir dies mit Überzeugung zugegeben hast, lieber Leser, lies nicht weiter)». (A. Einstein, *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie — gemeinverständlich*, p. 14.

lique, mais ils sont intimement liés au mouvement, de sorte qu'on peut, du moins partiellement, les échanger.

La théorie de la relativité générale introduit un nouvel aspect dans la discussion : celui d'une géométrie dynamique. Les observations fondamentales qui restent à la base de la théorie de la relativité générale concernent l'extension du principe de relativité à tous les systèmes de référence, accélérés ou non, et le principe d'équivalence entre la masse d'inertie et la masse de pesantur. Tous les deux sont des observations concernant le mouvement. La première énonce la relativité complète du mouvement et est une règle de covariance générale : la physique est invariante *mutatis mutandis* par rapport à la description choisie. Cette observation est une extension naturelle du principe de la relativité galiléenne sur lequel est basée la relativité spéciale. La deuxième permet de retrouver, à l'aide de l'accélération, la gravitation comme structure de l'espace-temps (indépendante de l'objet sur lequel elle agit, dans la limite d'un objet « très petit » — une sonde). Cette base est empirique et remonte à la loi de Galilée sur la chute des corps (l'indépendance par rapport à la masse). La structure axiomatique de la théorie est reflétée dans des équations coordonnant la variation de la métrique de l'espace-temps ; elle introduit comme nécessaire la possibilité des géométries non-euclidiennes en représentant les forces de gravitation. L'interprétation de la théorie fait appel aux sondes et aux rayons de lumière pour déterminer la géométrie de l'espace-temps. La question de savoir si entre deux points de l'espace il y a seulement une ligne droite devient une question empirique, la mathématique en offrant les structures logiques permettant de décrire, et donc d'objectiver, l'une ou l'autre de ces situations.

Finalement, la théorie quantique est basée sur une reconsidération de la notion d'état d'un système. L'état n'est plus déterminé à l'aide de l'ensemble de toutes les propriétés du système, mesurables indépendamment l'une de l'autre et sans aucune interférence. L'état de détermination maximale (l'état « pur » représenté par un vecteur dans l'espace Hilbertien du système) est défini à l'aide d'un ensemble de propriétés mesurables (observables) du système mais peut être ambigu concernant les valeurs de certains autres observables qui représentent des propriétés tout aussi mesurables du système. Ceci résulte immédiatement du principe de superposition, sur lequel est basée la structure d'espace de Hilbert. Le principe de superposition est un principe constructif, il permet de trouver de nouveaux états possibles du système à partir

d'un set d'états donnés. Si un système peut se trouver dans deux états (purs) particuliers, une « superposition » (décrite par une combinaison linéaire à coefficients complexes) de ces deux états est aussi un état (pur) possible du système. Supposons que les deux états originaux soient définis par des valeurs non-équivoques mais différentes d'un observable physique ; alors l'état de « superposition » sera généralement équivoque concernant cet observable. Des expériences répétées pour mesurer cet observable sur le système préparé chaque fois dans cet état de superposition donneront chaque fois une autre valeur et changeront d'une manière incontrôlable l'état du système. La statistique de ces résultats est déterminée par une probabilité définie à partir de l'état initial. Ainsi le concept de « chance (hasard) » prend un rôle essentiel dans la théorie. En particulier il est en principe impossible de donner une cause suffisante pour l'événement : « ce noyau vient de se désintégrer ». La mécanique quantique décrit des « particules » zénoennes qui ne suivent pas des trajectoires avec des positions et des vitesses bien définies à chaque instant, mais pour lesquelles on peut donner une fonction des positions *ou* des vitesses décrivant l'évolution de leurs états dans le temps. Ces fonctions ont un caractère ondulatoire qui fait qu'en certaines circonstances on observe des effets typiques d'interférence. La « particule quantique » *se comporte* parfois comme une vraie particule, parfois comme une onde.

Après cette courte revue de certains faits physiques et avant d'aborder la question de l'intuition nous allons faire quelques commentaires sur le rôle de la mathématique dans la physique. D'après Weyl : « les étapes suivies par la recherche fondamentale en mathématique dans les derniers temps correspondent aux trois positions épistémologiques fondamentales. La fondation sur la théorie des sets est l'étape du réalisme naïf, qui ne réalise pas le passage de ce qui est donné à ce qui transcende. Brouwer représente l'idéalisme, car il réclame la fondation de toute vérité sur ce qui est donné intuitivement. Dans le formalisme axiomatique la conscience réussit finalement à « sauter par-dessus son ombre », à dépasser la matière du « donné », à représenter le transcendant ; mais, comme cela se comprend aisément, seulement dans le symbole¹⁹ ». Par exemple, on peut construire axiomatiquement des es-

19. «Die Stufen, welche die Grundlagenforschung in der Mathematik während der letzten Zeit durchlaufen hat, entsprechen den drei fundamentalen erkenntnis

paces de dimension arbitraire, celle-ci étant définie abstraitement comme le nombre des vecteurs linéairement indépendants ou, ce qui est équivalent, le nombre des coordonnées nécessaires pour fixer un point. Et « seulement sur la base d'une telle géométrie n -dimensionnelle, obtenue comme nécessaire à la suite d'une telle formalisation, la question de la dimension de l'espace acquiert un sens, et on peut se demander : à cause de quelles particularités le cas "3" se distingue-t-il des autres cas ?²⁰ » C'est là la « libération de l'esprit » dont parle Cassirer.

Dans la suite de mon exposé je vais me concentrer sur la question de l'espace et du temps dans les théories de la relativité et dans la mécanique quantique. Je vais essayer de préciser la discussion d'Ernst Cassirer sur ce point en distinction avec une autre discussion contemporaine qui porte aussi beaucoup d'intérêt.

Dans un texte de 1937 Grete Hermann discute la rélevance épistémologique du « doute dans la causalité » en mécanique quantique et de « l'ébranlement de nos représentations de l'espace et du temps » dans les théories de la relativité²¹. Elle commence par remarquer qu'on doit distinguer entre la question de la révision de l'image de la nature offerte par la physique classique et la question de la nécessité épistémologique de certaines représentations classiques. Sa discussion du problème de la causalité est fondée sur deux arguments. Le premier concerne le fait (déjà mentionné auparavant) que dans la théorie quantique l'état d'un

theoretischen Einstellungsmöglichkeiten. Die mengentheoretische Begründung ist die Stufe des naiven Realismus, der sich des Überganges vom Gegebenen zum Transzendenten nicht bewußt wird. Brouwer vertritt den Idealismus, indem er Zurückführung aller Wahrheit auf das anschaulich Gegebene fordert. Im axiomatischen Formalismus endlich unternimmt das Bewußtsein den Versuch, "über den eigenen Schatten zu springen", den Stoff des Gegebenen hinter sich zu lassen, das Transzendente darzustellen; aber, wie sich von selbst versteht, nur im Symbol». *PMN*, p. 53.

20. « Erst auf Grund einer solchen durch Formalisierung zwingend gewonnenen n -dimensionalen Geometrie hat das Problem der Dimensionszahl, die Frage einen Sinn : Durch welche inneren Eigentümlichkeiten ist der Fall $n = 3$ vor den andern ausgezeichnet ? Wenn Gott bei Erschaffung der Welt dem Raume gerade 3 Dimensionen verlieh, läßt sich dafür durch Aufdeckung solcher Eigentümlichkeiten irgendein « vernünftiger » Grund angeben ? » *PMN*, p. 57.

21. Grete HERMANN, *Die Bedeutung der Modernen Physik für die Theorie der Erkenntnis*, 1937.

système est défini d'une manière essentiellement différente de celle de la physique classique, ce qui fait que la détermination des propriétés d'un système dans une mesure ne peut être considérée comme indépendante de l'arrangement de l'observation. Cela veut dire qu'on ne peut pas conclure à partir du principe de causalité qu'il doit être possible de prédire exactement les résultats de l'observation comme étant les conséquences d'une cause bien définie. En conséquence, le caractère probabiliste des prédictions de la mécanique quantique, qui est lié au problème de l'observation (et non à celui de l'évolution inobservée d'un système, qui, comme cela est bien connu, est complètement déterministe) ne peut pas être interprété comme dû à la violation du principe de causalité. Le deuxième argument donné par Grete Hermann est basé sur le « principe de correspondance » énoncé par Bohr et à la suite duquel la mécanique classique doit être considérée non pas seulement comme une limite de la mécanique quantique mais en fait comme partie de son axiomatique, essentielle pour la définition de celle-là.

Dans la mesure où le premier des ces arguments n'est pas entendu comme influence du subjectif il est en fait similaire à celui de Cassirer. Ce dernier fait une discussion plus générale de l'applicabilité des implications causales en vue de la limitation dans la donnée des données initiales inhérentes dans la mécanique quantique (on ne peut pas donner simultanément des valeurs précises pour des grandeurs « incompatibles », comme la position et la vitesse). Nous reviendrons là-dessus. Dans son argumentation Grete Hermann tend à lier ceci au manque de complétude de la mécanique quantique. En fait, elle prend ici la position de Einstein-Podolski-Rosen²². Dans un article de 1935, Grete Hermann dit très clairement : « plus il est important pour la théorie physique de présupposer l'observation maximale de toutes les grandeurs analysées, moins il est interdit, par cette condition, que le développement de la recherche en découvre des grandeurs physiques nouvelles, inconsiderés jusqu'à présent²³ ».

22. A. EINSTEIN, B. PODOLSKY & N. ROSEN, «Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? », *Phys. Rev.* 47, 1935, p. 777.

23. «So wichtig es für die physikalische Theorie auch ist, von maximalen Beobachtungen hinsichtlich aller untersuchten physikalischen Größen auszugehen, so wenig ist durch die damit gestellte Bedingung ausgeschlossen, daß die

Il est intéressant de remarquer que Grete Hermann critique explicitement la démonstration d'un théorème de von Neumann qui rejette les « variables cachées »; trente années plus tard ce théorème sera falsifié par J. S. Bell qui va lui-même établir un théorème sur l'impossibilité des « variables cachées » *locales*²⁴. Ce dernier théorème de Bell, qui remplace celui plus général mais défectueux de von Neumann critiqué par Grete Hermann, même s'il est plus restreint décourage tout de même le recours à l'argumentation de « incomplétude », parce que des variables cachées *non-locales* sont mal adaptées pour sauver un concept intuitif de causalité concernant des événements dans l'espace-temps. L'argument de Grete Hermann conduit ainsi à une impasse.

Le deuxième argument, basé sur le « principe de correspondance »²⁵, est dû à une formulation particulière de la mécanique quantique, qui était la formulation dominante à cette époque. Ce n'est que depuis peu qu'on en arrive à une interprétation homogène de la mécanique quantique. Ici le principe de correspondance n'est plus qu'un instrument heuristique, il n'est plus nécessaire pour l'interprétation de la théorie. À l'opposé, les *phénomènes classiques* deviennent expliquables dans la mécanique quantique comme des cas où la dynamique conduit à la perte de cohérence quantique (émergence des propriétés classiques par « décohérence »). Même si la nécessité du postulat de mesure n'est pas affaiblie, l'apparition des phénomènes classiques n'est plus une preuve pour l'existence des concepts et intuitions classiques irréductibles (l'image des « deux mondes »). Dans le cas du principe de correspondance nous rencontrons une des situations dangereuses dans l'interprétation épistémologique des théories physiques : la construction des théories physiques est un processus dynamique qui a ses lois et ses raisons et n'est pas liée d'une

fortschreitende Forschung neue, bisher unberücksichtigte physikalische Größen entdeckt» Grete HERMANN, *Abh. der Fries'schen Schule*, Band VI, Heft 2, 1935, p. 98.

24. John S. BELL, «Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics», Cambridge : Cambridge University Press, 1987.

25. «Das Bohrsche Korrespondenzprinzip ist wohl der schärfste Ausdruck dafür, daß nach wie vor die "klassischen Begriffe" die Bausteine der physikalischen Theorien sind.» («Le principe de correspondance de Bohr est clairement l'expression la plus précise du fait que tout comme précédant les concepts classiques sont les éléments constitutifs des théories physiques.») G. Hermann, *Die Bedeutung der Modernen Physik für die Theorie der Erkenntnis*, 1937, p. 1.

manière simple et non-équivoque à un point de vue épistémologique précis, même si ça semble parfois suggéré par l'une ou l'autre formulation de la théorie.

Voyons maintenant le cas des théories de la relativité. Ici je vais me contenter de citer les conclusions de Grete Hermann. Concernant la relativité spéciale elle remarque, que si la détermination de la simultanéité ne peut plus être faite absolument, elle n'en est pas moins bien définie dans chaque système de référence où elle reste le fondement de toute mesure des relations spatio-temporelles des événements physiques. D'une façon similaire elle remarque dans le cas de la relativité générale, que si celle-ci rejette un espace-temps absolu, elle n'en utilise pas moins les concepts euclidiens chaque fois que des mesures doivent être faites. En remarquant très correctement que la partie interprétative d'une théorie est tout aussi importante que sa partie formelle, Grete Hermann en arrive à la conclusion que « ce système de relations par lequel le formalisme acquiert son caractère physique en premier lieu, présuppose dans les théories de la relativité tout comme dans la physique classique les intuitions classiques de l'espace et du temps²⁶ ». Mais ici aussi Grete Hermann semble identifier processus d'observation et processus d'objectivation. (Rappelons-nous qu'Einstein aussi insiste sur la nécessité d'une définition opérationnelle : « Pour un physicien le concept existe si et seulement si on a la possibilité de déterminer dans un cas concret si le concept est applicable ou non ». Mais c'est la *possibilité* d'une telle définition qui a une signification, pas une certaine définition en particulier.)

La conclusion de l'analyse de Grete Hermann est que le principe de causalité, tout comme les intuitions classiques d'espace et de temps, ne seraient pas touchés par la physique moderne, c'est-à-dire la mécanique quantique et les théories de la relativité. Au lieu de cela, ce qui serait perdu serait le caractère absolu de la description de la nature par la physique. Mais, comme j'essayais d'indiquer dans la présentation de ses arguments, cette argumentation, si intéressante (et compétente !) qu'elle soit, doit être considérée de façon critique : l'assurance de l'immuabilité de l'in-

26. « Diese Zuordnung, die dem Formalismus überhaupt erst den physikalischen Charakter gibt, setzt, in der Relativitätstheorie so gut wie in der klassischen Physik die klassischen Vorstellungen von Raum und Zeit voraus », G. Hermann, *Die Bedeutung der Modernen Physik für die Theorie der Erkenntnis*, 1937, p. 40.

tuition «classique» est achetée au prix de la la solidification d'une rupture entre connaissance et monde extérieur qui n'est pas seulement une question de définition (la «chose en soi» kantienne) mais est visible au niveau même du connu. Nous allons considérer à présent la discussion de Cassirer.

Il me semble utile de citer en première place Cassirer définissant sa position concernant la philosophie critique kantienne, parce que la référence aux concepts kantien est fondamentale pour la discussion cassirérienne dans son œuvre *Sur la Physique Moderne* (*Zur modernen Physik*) qui rassemble les deux textes «Zur Einsteinischen Relativitätstheorie» de 1921 et «Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik» de 1935. Dans le premier chapitre du texte concernant la théorie de la relativité Cassirer écrit : «S'il devait s'avérer que les nouvelles intuitions concernant l'espace et le temps conduisent [...] aussi loin de Kant que de Newton : le temps serait alors venu, basé sur les prémisses kantien, de dépasser Kant. Parce que ce que la critique de la raison pure cherchait à réaliser n'était pas de fixer la connaissance philosophique une fois pour toutes dans un certain système dogmatique de notions ; mais elle cherchait à ouvrir à la connaissance philosophique la "marche continuelle d'une science" dans laquelle il n'y a toujours que des points de repos et de stabilité relatifs et jamais absolus²⁷». Mais cette décision n'est pas une question pour la physique, elle est une question que l'épistémologie doit, en se laissant conduire empiriquement par la physique, discuter et répondre. Et parce que c'est l'objectivité des concepts d'espace et de temps qui est en discussion, celle-ci doit se concentrer sur la définition des objets de la physique. La physique moderne renonce à l'absolu des choses. «Mais le renoncement à l'absolu des choses n'inclut pas du tout le renoncement à l'objectivité de la connaissance aussi. Parce que ce qui est vraiment objectif pour l'épistémologie moderne ce ne sont pas les choses mais les lois²⁸». Comme nous le voyons, la référence kantienne de Cassirer doit être comprise à travers son entendement fonctionnel de la démarche cognitive, comme il l'avait précisé dans son œuvre de 1910 *Substance et fonction* (*Substanzbegriff*

27. ZMP, p. 8.

28. ZMP, p. 44-45.

und Funktionsbegriff). Il peut donc conclure « que par la perte de “l’unité de chose” de l’espace et du temps leur “unité fonctionnelle” ne fut pas perdue, tout au contraire qu’elle fut en vérité fondée et stabilisée²⁹ ».

Spécifiquement en ce qui concerne la détermination des moments de temps dans la relativité spéciale, Cassirer remarque que l’objectivité de cette détermination réside dans la possibilité de la redéfinir sans aucune ambiguïté à l’aide de lois précises (les transformations de Lorentz). « C’est cette unicité de l’ordre référentiel [...] qui est la seule à survivre à la notion de l’unité du temps. [...] une unicité qu’on ne peut plus représenter comme un contenu unique mais seulement comme un système de relations valables³⁰ ». « La détermination objectivante se révèle ainsi beaucoup plus complexe que dans la mécanique classique » et « qu’on fasse ici un pas au-delà de Kant est indiscutable » car celui-ci est basé explicitement sur la mécanique classique dans ses « analogies de l’expérience » (*Analogien der Erfahrung*). Mais ça ne fait que vérifier l’idée « que ce sont les lois de la raison qui conduisent toutes nos déterminations spatio-temporelles³¹ ». Vue d’une telle façon, « l’intuition pure » kantienne d’espace-temps ne serait pas mise en doute par la théorie de la relativité. Voyons alors plus précisément comment Cassirer comprend le problème de l’intuition pure et de son rôle *a priori*. Ceci devient plus clair en suivant sa discussion sur la relativité générale.

En ce qui concerne les géométries non-euclidiennes la question épistémologique est : « peut-on trouver une relation unique entre les symboles d’une géométrie non-euclidienne et la multitude empirique des événements spatio-temporels ? Si la physique y répond par l’affirmative, l’épistémologie critique n’a pas de raison, ni le droit, d’y répondre autrement. Parce que l’*a priori* de l’espace, que l’épistémologie critique pose comme condition pour toute théorie physique, n’implique aucune détermination particulière de la structure de l’espace, mais concerne seulement cette fonction de “spatialité partout” [...]»³². Mais cet entendement fonctionnel permet une version totalement différente de la suggestion « forme / contenu » de Helmholtz. Essayons de la préciser.

29. *ZMP*, p. 73.

30. *ZMP*, p. 74.

31. *ZMP*, p. 74.

32. *ZMP*, p. 93.

Cassirer montre clairement qu'il ne peut pas s'agir ici d'une question de «deux espaces», comme nous l'avons mentionné dans l'introduction. Ci-dessous il cite Leibniz : «On peut dire qu'il ne faut pas s'imaginer deux étendues, l'une abstraite, de l'espace, l'autre concrète, des corps ; le concret n'étant tel que par l'abstrait³³». Nous n'avons alors pas à craindre une incompatibilité des conditions d'objectivation. Voyons alors s'il offre ici une solution différente de l'autre suggestion que nous avons critiquée auparavant, celle d'une intuition instruée. En effet, dans l'entendement fonctionnel de l'intuition de l'espace-temps que Cassirer nous propose la structure apparaît dans la dynamique des processus de raisonnement. Dans cet entendement l'intuition et le raisonnement apparaissent plus intimement liés et la structure existe, pour ainsi dire, dès le commencement dans la multitude des possibilités. «Le pas au-delà de Kant [...] résiderait ici dans la reconnaissance du fait que cette détermination par le raisonnement de l'image du monde physique doit aussi recourir aux axiomes géométriques autres qu'euclydiens [...] et que permettre ceci loin de détruire l'unité du monde en fait la met sur un nouveau fondement, d'un principe supérieur — celui même de la relativité générale³⁴». La géométrie euclidienne est ici seulement une des géométries possibles et sa simplicité apparente est seulement méthodologique : «la géométrie euclidienne reste la plus "simple" pas dans un sens pratique mais dans un sens logique³⁵». «Le développement de la relativité générale lui a aussi préservé cet avantage méthodologique de la géométrie euclidienne³⁶». C'est une position très différente de celle de Grete Hermann. (Pour un contraste «dans l'autre sens» on pourrait prendre la discussion de Reichenbach, le physicien étant beaucoup plus radical que Cassirer en renonçant à une intuition immuable de l'espace et du temps).

Passons finalement à la discussion cassirérienne de la mécanique quantique. Sans entrer dans les détails remarquons que pour Cassirer, naturellement, le principe de causalité est en fait le principe le plus élevé parce qu'il équivaut à la légalité même, à la

33. Gotfried Wilhelm LEIBNIZ, *Nouveaux essais*, 43, V, 115 (cité dans *ZMP*, p. 79).

34. *ZMP*, p. 101.

35. *ZMP*, p. 97.

36. *ZMP*, p. 97.

compréhensibilité du monde. Il est alors également clair qu'on doit distinguer sa validité générale indiscutable de la question de la possibilité de sa « schématisation » spatio-temporelle dans le cadre d'une théorie physique. Mais la mécanique quantique ne contredit pas plus que cela : nous sommes obligés de renoncer à une description à la fois causale et spatio-temporelle des phénomènes atomiques : « A cette situation correspond dans le formalisme de la théorie le fait qu'il existe un schème mathématique de la théorie quantique, mais que ce schème ne peut pas être interprété comme une simple relation causale entre les choses dans l'espace et le temps³⁷ ». Cassirer fait ici, à mon avis, un pas nouveau et très important quand il remarque que : « La "crise de la causalité" provoquée par la mécanique quantique existe et est bien sérieuse. Mais elle n'est pas une crise du concept pur de la causalité, mais une "crise de l'intuition", elle nous montre que nous ne pouvons plus référer ce concept comme d'habitude à l'intuition du temps pur et le schématiser dans le temps. [...] Nous ne pouvons plus, comme dans la physique classique, lier la causalité à la description spatio-temporelle, d'autant moins la laisser "entrer" dans celle-ci³⁸ ». Et Cassirer stabilise cette ligne de pensée en citant Goethe qui parle du « conflit entre l'intuition et le raisonnement », car « il s'est toujours révélé jusqu'à présent, que des conflits de ce genre n'ont pas seulement une signification négative mais ils ont une signification éminemment positive, qu'au lieu d'imposer des barrières insurmontables à la connaissance, ils se montrent tout au contraire comme ses plus importantes forces motrices³⁹ ». Si Cassirer était en train d'ouvrir une nouvelle discussion de l'*a priori* des intuitions d'es-

37. «Dieser Sachlage entspricht in dem Formalismus der Theorie, daß zwar ein mathematisches Schema der Quantentheorie existiert, daß dieses Schema aber nicht als einfache Verknüpfung von Dingen in Raum und Zeit gedeutet werden kann». Werner HEISENBERG, *Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie*, Mannheim : Bibliographisches Institut, 1986, p. 48.

38. «Die "Krise der Kausalität", die durch die Quantenmechanik herbeigeführt worden ist, besteht freilich, und sie ist ernst genug. Aber sie ist keine Krise des reinen Kausalbegriffs, sondern eine "Krise der Anschauung" ; sie zeigt uns, daß wir diesen Begriff nicht länger in der gewohnten Weise auf die Anschauung der "reinen Zeit" beziehen und in dieser "schematisieren" dürfen. [...] Wir können die Kausalität nicht mehr in derselben Weise wie in der klassischen Physik mit der Raum-Zeitbeschreibung verbinden, geschweige daß wir sie in dieser letzteren aufgehen lassen können». *ZMP*, p. 315.

39. «[...] hat sich doch bisher stets gezeigt, daß derartige Konflikte nicht nur eine negative sondern eine eminent positive Bedeutung haben, daß sie, statt unü

pace et de temps (qu'il ne poursuit pas dans ce texte), ça pourrait conduire à préciser la dynamique du processus de la connaissance, telle qu'il se l'imagine. En tout cas, il est clair, que renoncer à « l'absolu des choses » est pour Cassirer un moment éminemment constructif et pas du tout l'acceptation d'une rupture.

Les théories de la relativité et la mécanique quantique sont développées sur le *background* de la théorie de l'électromagnétisme et de la mécanique classique. Ils constituent eux-mêmes un niveau intermédiaire dans la description des phénomènes fondamentaux, car les principes des théories de la relativité et de la théorie quantique étant des principes généraux, ils doivent avoir une validité générale, c'est-à-dire qu'ils doivent être applicables simultanément. Les théories des champs quantiques réalisent cette demande du moins en ce qui concerne la relativité spéciale, comprenez qu'elles sont applicables aux phénomènes qui ne concernent pas les forces gravitationnelles fortes. Ces théories minkowskiennes des champs quantiques (soit dans l'espace-temps sans courbure) décrivent bien les phénomènes élémentaires jusqu'aux distances les plus petites observables aujourd'hui, d'environ un sur un million de l'échelle d'un atome. Les difficultés apparaissant dans le programme d'unification, qui essaye de trouver une théorie générale des phénomènes fondamentaux, ces difficultés pourraient être dues à l'incapacité actuelle de construire une théorie quantique de l'espace-temps. Mais déjà dans les théories actuelles on est confronté à une quatrième étape dans la « destruction » de l'intuition classique de l'espace et du temps, après les secousses dues à la théorie de la relativité spéciale, à la théorie de la relativité générale et à la mécanique quantique. Si la structure globale des théories des champs est celle de la relativité spéciale, les propriétés locales de l'espace-temps ne sont plus indépendantes de la structure dynamique de la théorie. Par le concept même de

bersteigliche Schranken an der Erkenntnis aufzurichten, sich vielmehr als deren wichtigste Triebkräfte erweisen». *ZMP*, p. 329. Goethe a tout de même une compréhension de l'intuition différente de celle kantienne, pour lui l'intuition est dynamiquement liée à la raison qu'elle conduit. J'ai commenté en un autre lieu (*Anschaung*) la possibilité que, par sa citation de Goethe, Cassirer a voulu suggérer cette dynamisation de l'intuition, mais il est difficile de trouver une suite systématique à ce point de vue.

champ, qui décrit une distribution spatio-temporelle, les théories des champs ont une signification immédiate pour le concept du *continuum de l'espace-temps*. Le « programme de renormalisation » dans les théories des champs quantiques, qui est partie intégrale de la théorie, concerne directement la définition de la théorie pour des distances très petites, c'est-à-dire, dans la limite du *continuum*. Ce programme reflète en effet une loi de covariance concernant les paramètres (masses, charges, etc.) par lesquels on exprime la théorie, en liaison avec des transformations d'échelle, par lesquelles on peut suivre les phénomènes comme ils se présentent en approchant le *continuum*. On trouve alors une relation intime entre la structure des quantités qui décrivent ces phénomènes et l'échelle des mêmes phénomènes. Cela signifie qu'on ne peut pas donner « cinématiquement » la structure spatio-temporelle indépendamment de la structure dynamique (l'interaction) de la théorie. Le programme de renormalisation effectue une liaison indestructible entre les deux structures, en dépit du fait qu'on n'a ici, pour commencer, aucune liaison logique entre structure spatio-temporelle et dynamique (comme le principe d'équivalence dans la théorie de la relativité générale). Si l'on prend le point de vue que ce sont les quantités construites des champs qui « sondent » le *continuum* (en analogie avec les « rayons de lumière » dans la théorie de la relativité générale), cette situation suggère une reconsidération conceptuelle profonde du rôle et de la détermination relative des « concepts » (structures symboliques) d'interaction et d'espace-temps. Et dans les idées actuelles concernant une théorie unifiée de tous les phénomènes, y compris la gravitation une cinquième étape dans la reconsidération de l'espace-temps semble s'annoncer. « Curvature oscillations tend to become uncontrollable at short distance scales. Is there a way to "smoothen out" short scale curvatures? In some sense Nature must become regular there. It is suggestive to speculate that space-time might cease to be continuous but becomes "quantized" into some sort of space-time lattice⁴⁰ ». En effet, dans les modèles de cosmologie quantique l'espace et le temps classiques apparaissent comme des grandeurs « dérivées », obtenues par « décohérence ». Quel serait alors le status conceptuel de l'espace et du temps ? « In what direction should we expect the

40. Gerald't HOOFT, « Quantum field theory for elementary particles », *Physics Reports*, 104, 1984, p. 133.

concept of time to evolve ? I believe that the history of elasticity supplies a guide. A great textbook of physics of the 1880s made elasticity a central topic. Knowing the values of the two elastic constants of a material, it showed how one could predict for that material the speed of sound, the bending of a beam and the natural frequencies of a vibrator. But where did the physics of that day get the elastic constants ; They were fed in from outside the theory, not deduced from inside. Now, a century later, solid-state physics lets us deduce elasticity from Schrödinger's equation applied to a system of electrons and nuclei. However the very derivation shows us that it has no meaning to speak of "elasticity" in the space between the electron and the nucleus. In brief a concept that was primordial and precise but had to be fed in from outside has been replaced by a concept that is secondary and approximate and derived from inside. We have to expect a development no less dramatic in our view of "time"; expect to see "time", not as primordial and precise, but secondary, approximate and derived. If the last hundred years gave us "elasticity without elasticity", may we not expect the next hundred years to show us the way to "time without time"⁴¹ ?

Le *terminus ad quo* devient un *terminus ad quem*, « d'un déterminé absolu l'être physique est devenu un déterminé sans fin⁴² » dit Cassirer. Est-ce que nous pourrions suivre ce processus sans flexibiliser et dynamiser nos intuitions, sans construire toute une « échelle » d'intuitions, adaptées à « l'échelle » des phénomènes ? Intuitions qui perdraient alors tout caractère immuable mais acquerraient une certaine relativité mutuelle qui en même temps leur donnerait la stabilité nécessaire ? Cela serait compatible avec une compréhension relative-procédurale de « l'*a priori* », dans le sens d'Einstein, par exemple. Mais ce serait compatible aussi avec la notion offerte par Cassirer lui-même des principes « *a priori* » comme « les invariants de l'expérience » (*Invarianten der Erfahrung*) que toute épistémologie envisage de déterminer comme son « *terminus ad quem* ». Ou bien, peut-être devrions-nous renoncer complètement à l'intuition comme outil d'objectivation à la fois simple, naturel et immuable : « Plus les recherches

41. John A. WHEELER, « Harbingers of a coming third era of physics », *Physics Reports*, 104, 1984, p. 229.

42. « Aus einem absolut-Bestimmten ist [das physikalische Sein] zu einem ohne Ende Bestimmbaren geworden ». *ZMP*, p. 278sq.

physiques s'éloignent des phénomènes qui ont influencés directement la croissance de l'esprit, moins nous pouvons nous attendre à ce que les lois qui les gouvernent apparaissent "simples", c'est-à-dire constituées de quelques concepts qui sont naturels pour notre esprit⁴³ ». Dans les théories modernes le rôle de l'intuition serait alors pris par les tableaux et représentations non-visuelles cherchant à la fois à donner une perception simultanée des structures relationnelles et à relativiser cette perception en vue de ses défauts innés (un peu comme l'opposition particule-champs pour les objets de la physique quantique).

J'ai essayé ici de poursuivre la discussion cassirérienne pour voir si elle offre une solution prometteuse d'un apriorisme relativisé entendu comme instrument dans un schème dynamique du processus de la connaissance. Ses idées semblent en effet indiquer une telle solution, sa discussion ne débouche tout de même pas sur une définition qui se distancerait clairement de l'apriorisme kantien. Mais le contraste avec une discussion « classique » comme celle de Grete Herrmann fait surgir une estimation assez claire de la direction dans laquelle on pourrait poursuivre Cassirer, tout spécialement dans le dépassement qui s'ensuit du dualisme et dans la dynamisation de l'intuition⁴⁴.

Ion-Olimpiu STAMATESCU

43. «Je weiter sich die physikalische Forschungen von Phänomenen entfernen, die das Wachstum des Geistes unmittelbar beeinflußt haben, desto weniger können wir erwarten, daß die Gesetze, die sie beherrschen, als "einfach" erweisen, d.h. als aus einigen wenigen Begriffen bestehen, welche für unseren Geist natürlich sind». Charles Sanders PEIRCE, *Naturordnung und Zeichenprozess*, H. Pape Hrsg., Frankfurt: Suhrkamp, 1991, p. 144.

44. J'ai le plaisir de remercier Heinz Wisman de m'avoir rendu attentif à l'article de Grete Herrmann, Enno Rudolph et Christiane Schmitz pour maintes discussions. Je remercie beaucoup Nathalie Janz et Christiane Schmitz pour avoir lu et corrigé le manuscrit et pour leurs remarques très utiles.

