Structure versus substance. Théories physiques et réalisme structural selon Russell

Ivahn Smadja

Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/cpuc/1351>

DOI : 10.4000/cpuc.1351

ISSN : 2677-6529

Éditeur

Presses universitaires de Caen

Édition imprimée

Date de publication : 15 décembre 2008

Pagination : 121-159

ISBN : 978-2-84133-332-5

ISSN : 1282-6545

Référence électronique

Ivahn Smadja, « Structure versus substance. Théories physiques et réalisme structural selon Russell », *Cahiers de philosophie de l'université de Caen* [En ligne], 45 | 2008, mis en ligne le 04 septembre 2020, consulté le 12 février 2023. URL : <http://journals.openedition.org/cpuc/1351> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/cpuc.1351>

Creative Commons - Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 4.0 International - CC BY-NC 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

STRUCTURE VERSUS SUBSTANCE. THÉORIES PHYSIQUES ET RÉALISME STRUCTURAL SELON RUSSELL

Une fois achevée la rédaction des *Principia Mathematica*, Russell se tourne vers la théorie physique et s'attaque au problème philosophique que pose notre connaissance du monde extérieur. Pendant plus d'une décennie, il élabore une « philosophie de la physique » à partir de l'analyse des avancées décisives de cette période marquée tant par l'avènement du « règne de la relativité »¹ que par la transformation profonde des cadres conceptuels qu'imposait la prise en compte des phénomènes quantiques. L'impulsion première qui conduit à la conception d'ensemble exposée dans *The Analysis of Matter* (1927), vient de A.N. Whitehead auquel Russell est redevable de l'avoir éveillé de son « sommeil dogmatique »². La méthode de construction des points d'espace-temps à partir des « événements » proposée par le premier montrait en effet la voie pour une application de la méthode de l'analyse logique à la physique. Russell développe ainsi une interprétation philosophique de la théorie de la relativité dont la pierre angulaire consiste en une reconstruction de la variété espace-temps, au moyen d'une méthode inspirée de Whitehead mais plus conforme à ses propres visées philosophiques. Le problème principal de la philosophie de la physique tient, pour Russell, au fait qu'elle ne livrerait plus qu'une « structure » sans « substance », selon les termes d'une opposition qu'il emprunte à

1. Cf. Ryckman 2005.

2. Russell 1961, p. 128. Russell emprunte de fait cette formule kantienne à Whitehead qui l'employait lui-même pour marquer sa dette vis-à-vis d'Einstein et de Minkowski, cf. Whitehead 1922, Préface, p. V. : « Le présent ouvrage est l'exposition d'un traitement alternatif de la théorie de la relativité. Il a son origine dans ce "réveil du sommeil dogmatique" – pour utiliser une expression kantienne – que nous devons à Einstein et Minkowski. »

A.S. Eddington. Au début des années vingt, ce dernier était en effet l'un des physiciens qui connaissaient le mieux la relativité, restreinte et générale, et qui contribuèrent à la développer en la présentant sous une forme rigoureusement déductive dont Russell reconnaît être largement tributaire³. Outre une interprétation des équations du champ gravitationnel censée « internaliser » la gravitation à la géométrie, Eddington présente et étend le programme géométrique d'unification de l'électricité et de la gravitation de Weyl⁴. Les conceptions de Russell « cristallisent » donc pour ainsi dire pendant cette période où le « rêve cartésien »⁵ d'une théorie du champ unifié était vivace. Dans ce contexte, Eddington identifie la matière avec certaines propriétés de structure que nous appréhendons comme permanentes dans l'univers physique, et les tenseurs devaient constituer l'instrument privilégié de cette incorporation de la matière à la structure. Dans les pages qui suivent, nous voulons montrer que la philosophie de la physique de Russell et la variété de réalisme structural qu'il promeut se comprennent à partir de deux exigences fondamentales, formulées respectivement par Eddington et Whitehead, à savoir (1) la promotion de la structure au détriment de la substance et le mouvement inexorable de « désubstantialisation » de la matière, mais aussi (2) l'exigence de « défaire les abstractions » de la physique en tentant de jeter un pont entre physique et perception.

La physique à l'épreuve de l'analyse logique

L'influence décisive de Whitehead dans la réflexion de Russell sur la physique des années vingt tient essentiellement à ce qu'il l'engageait à adopter une perspective foncièrement agnostique face aux abstractions de la théorie en requérant pour celles-ci une interprétation philosophiquement satisfaisante.

3. Russell 1927, p. 395-396 : « La théorie de la relativité est selon moi remarquable au plus haut point lorsqu'elle est considérée comme un système déductif logique. C'est la raison, ou l'une des raisons pour lesquelles je me suis trouvé faire si constamment allusion à Eddington. Lui, davantage qu'Einstein ou Weyl, a exposé la théorie sous une forme tout à fait appropriée aux buts d'un philosophe.... C'est donc en raison de ces buts philosophiques que je me suis permis de me laisser guider presque entièrement par Eddington. »

4. Eddington 1923.

5. Weyl 1922, § 35, p. 249.

Whitehead a inventé une méthode pour construire les points, les instants et les particules comme groupes d'événements, chacun d'une étendue finie. Cela me rendit possible de me servir du rasoir d'Occam en physique de la même manière que nous nous en étions servis en arithmétique. Je fus enchanté de cette nouvelle application des méthodes de la logique mathématique. Elle semblait impliquer que toute la plasticité des concepts utilisés en physique théorique pouvait être attribuée à l'ingéniosité des mathématiciens plutôt qu'à la nature du monde⁶.

Le succès de la méthode des constructions logiques dans le domaine des fondements des mathématiques pouvait en effet laisser espérer semblable fortune dans le cas des théories physiques.

Il y a fondamentalement trois questions qu'on peut poser à propos de la physique, et ce que Russell nomme le « problème de la matière » couvre et articule ces trois volets :

- (1) Quelle est la structure logique de la théorie physique considérée comme système déductif?
- (2) Comment rendre compte de la vérité des propositions de la physique ou encore de l'application de la physique au monde empirique ?
- (3) Quels sont les existants ultimes à propos desquels la physique énonce quelque chose de vrai, à supposer qu'il y en ait, et quelle est leur structure ?

Précisons la première de ces questions. Avant même de s'interroger sur la manière dont il conviendrait de définir les entités de la physique et d'en déduire les propositions à partir d'un appareil d'entités et de propositions primitives, il convient en effet de déterminer précisément la structure de la théorie. Dans tout système déductif, on a affaire à des hypothèses fondamentales concernant des objets indéfinis qui satisfont à ces hypothèses et on peut donc considérer ces objets comme des « variables ». L'axiomatisation de l'arithmétique par Peano conduit par exemple à formuler une théorie formelle constituée de propositions fondamentales qui ne comprennent qu'un nombre fini de termes primitifs, *nombre*, *zéro*, *successeur*. Le processus de l'interprétation consiste alors à substituer certaines structures logiques définies à ces variables ou objets indéfinis.

6. Russell 1961, p. 128.

Comme telle, l'arithmétique formelle de Peano ne définit que la notion de « progression » et non celle de nombre entier. C'est donc qu'une interprétation est nécessaire grâce à laquelle on précise la manière dont il faut comprendre les termes primitifs, par exemple en définissant logiquement les nombres cardinaux à la manière de Frege (comme classes de classes équinumériques).

Une fois dégagée la structure logique de la théorie physique, la question se pose alors de savoir quelle en est la bonne interprétation ou l'« interprétation significative », et ce choix engage une certaine conception philosophique. Prenons l'exemple de la géométrie. Russell considère fondamentalement la géométrie comme une partie de la physique et par conséquent l'axiomatisation de cette science ne devrait pas nous conduire à en interpréter les points comme n -uplets de nombres réels.

Nous ne considérerons pas qu'une géométrie est interprétée de manière satisfaisante jusqu'à ce que ses objets initiaux aient été définis en termes d'entités faisant partie du monde empirique, par opposition au monde de la nécessité logique⁷.

Comme toute autre géométrie et plus encore qu'une autre géométrie, la géométrie de l'espace-temps requiert une interprétation de ce type, et celle-ci reste à construire non seulement pour les notions de point et d'intervalle d'espace-temps, mais aussi plus généralement pour les notions des autres branches de la physique, comme celles de proton et d'électron. Cette perspective nous amène alors aux deux dernières questions mentionnées plus haut.

Bien que la physique puisse être développée comme un système de mathématiques pures, ce n'est pas en tant que mathématiques pures que la physique est significative. [...] Il faut croire que les lois de la physique sont au moins approximativement vraies, bien qu'elles ne soient pas logiquement nécessaires. Les éléments probants que l'on peut chercher pour les conforter sont empiriques. Toute preuve empirique consiste, en dernière analyse, en perceptions. Ainsi le monde de la physique doit être, en un sens, en continuité avec le monde des perceptions, puisque c'est celui-ci qui fournit ce qu'il y a de probant pour en accepter les lois⁸.

7. Russell 1927, p. 5. Nous nous référons à l'édition anglaise et traduisons nous-mêmes les passages cités.

8. *Ibid.*, p. 6.

La seule manière satisfaisante de rendre compte de la vérité de la physique est de combler le fossé existant entre les abstractions de la théorie d'une part et la masse des percepts de l'autre.

Si l'on considère la physique comme un système déductif dérivé de certaines hypothèses se rapportant à des termes indéfinis, existe-t-il des particuliers, ou des structures logiques composées de particuliers, qui satisfont à ces hypothèses ? Si la réponse est affirmative, alors la physique est complètement « vraie ». Nous allons voir, si je ne me suis pas trompé, qu'on ne peut pas donner de raison concluante à l'appui d'une réponse pleinement positive, mais qu'une telle réponse émerge naturellement si nous adoptons la conception selon laquelle toutes nos perceptions sont liées causalement à des antécédents qui peuvent ne pas être des perceptions. [...] Nous commençons, en physique, par une masse confuse de croyances de sens commun que nous pouvons soumettre à des raffinements progressifs sans porter atteinte à la vérité de la physique⁹.

Il n'est donc nullement question de définir les entités primitives de la théorie en termes de percepts, parce que les propositions de la physique ne nous disent rien à propos de nos percepts, quoiqu'elles nous disent bel et bien quelque chose de certains objets qu'il faudrait pouvoir caractériser.

La preuve de la vérité de la physique n'est rien d'autre que le fait que nos perceptions se produisent comme les lois de la physique stipulent que nous devons nous y attendre – *e.g.* nous voyons une éclipse quand les astronomes disent qu'il y aura une éclipse. Mais la physique ne dit jamais rien à propos [*about*] des perceptions. Elle ne dit pas que nous verrons une éclipse, mais elle dit quelque chose à propos du soleil et de la lune. Le passage de ce que la physique énonce à la perception attendue demeure vague et imprécis ; il n'a pas la précision mathématique qui appartient à la physique elle-même. Nous devons par conséquent trouver une interprétation de la physique qui donne aux perceptions la place qui leur revient ; si nous n'y parvenons pas, nous n'avons aucun droit d'en appeler au monde empirique¹⁰.

Il y a donc une tension entre ce que nous pourrions appeler l'« atavisme ontique » et le critère de « pertinence » [*aboutness*]. D'un côté, l'« atavisme ontique » est ce qui nous permet de transférer graduellement un certain contenu de réalité de la masse confuse

9. *Ibid.*, p. 9.

10. *Ibid.*, p. 7.

des percepts et croyances de sens commun aux entités abstraites de la physique. Mais de l'autre la qualification ontologique de la théorie est liée au critère de pertinence de la physique, c'est-à-dire à la question de savoir sur quoi porte notre connaissance. Lorsque par exemple nous recourons à un langage de classes, il n'est pas nécessaire que notre connaissance concerne *pertinemment* les classes ; elle n'est pas une connaissance « à propos » [*about*] des classes, qui porterait ainsi sur des entités réellement existantes. La méthode des constructions logiques nous permet de considérer les classes comme des « fictions logiques » et nous pouvons traduire les énoncés qui les contiennent de façon à ne pas être contraint de faire d'hypothèse ontologique concernant leur existence¹¹. Dans le cas de la théorie physique, quel serait alors le type d'objets à propos desquels nos conceptions scientifiques les plus assurées nous renseignent ? C'est le sens de la troisième et dernière question.

Nous verrons [...] que les objets qui sont mathématiquement primitifs en physique, tels que les électrons, les protons et les points d'espace-temps, sont des structures logiquement complexes composées d'entités métaphysiquement plus primitives, qui peuvent être appelées de manière commode « événements ». C'est l'affaire de la logique mathématique que de montrer comment on peut construire à partir de ces derniers les objets que requiert le physicien mathématicien¹².

Le « problème de la matière » consiste par conséquent à trouver une interprétation de la théorie physique qui puisse permettre à ses propositions de se rapporter en quelque manière aux percepts sans cependant renoncer à rendre compte de la *vérité* de la physique. C'est ce double réquisit qui conduit Russell à adopter la conception selon laquelle les objets du sens commun comme les entités que postule la science la plus abstraite sont des constructions logiques à partir d'événements. Il s'agit alors d'une part de justifier une sorte de processus d'abduction qui conduirait des percepts aux événements – nos percepts étant une sous-classe de la classe d'événements – en affirmant, grâce à une théorie causale de la perception, qu'il y a des événements qui ne sont pas des percepts ; mais il s'agit aussi d'autre part d'élaborer une ontologie des types d'occurrences physiques appropriée à la théorie de la relativité et à la théorie quantique.

11. Russell [1918] (1991), p. 341.

12. Russell 1927, p. 9.

« Pictorialité » et abstraction

À la suite de Whitehead, Russell fait sienne l'exigence fondamentale de « défaire les abstractions de la physique »¹³, en déjouant les pièges de notre langage. Lorsqu'un physicien par exemple dit qu'il peut « voir » un électron frapper un écran, il s'agit en fait d'une expression télescopée qui renvoie à une inférence complexe qu'il faut pouvoir reconnaître et déplier. La physique s'est ainsi graduellement éloignée du monde de tous les jours – « *like a monarch who has grown too grand to converse with his subjects* »¹⁴ – et cet écart grandissant impose au philosophe la tâche de repenser le rapport de la physique à la perception. Considérons le cas de la lumière telle que nous en faisons l'expérience et telle que la conçoit la physique.

Les données de la vue, analysées aussi finement qu'il est possible, se résolvent en formes colorées. Mais l'analogie physique de la couleur est un processus périodique d'une certaine fréquence relativement à l'œil de l'observateur. Le monde physique, il semble du moins naturel de l'inférer, est dépourvu de couleur. En outre [...] les couleurs sont des qualités qui sont statiques puisqu'elles durent, tandis que leurs contreparties sont des processus périodiques dans le médium entre l'œil et l'objet que nous disons « voir ». Ce qui se passe dans l'objet lui-même, s'il brille de sa propre lumière, est le genre de choses que la théorie de Bohr envisage : le saut soudain d'un électron d'une orbite à une autre. Ceci est très différent d'une sensation, comme celle du rouge par exemple. Et ce qui apparaît à l'œil comme une surface rouge est supposé être en réalité un volume dont la couleur apparente est due au fait que certains des électrons qui le composent « sautent » d'une certaine façon. Quand nous disons qu'ils « sautent », nous disons quelque chose de trop « pictorial »¹⁵. Ce que nous voulons dire est qu'ils possèdent une qualité inconnue appelée « énergie », qui est une fonction connue d'un certain nombre de petits entiers, et qu'un certain nombre de ces entiers ont soudainement changé leur valeur¹⁶.

13. *Ibid.*, p. 130 : « *the need of undoing the abstractions of physics* ».

14. *Ibid.*, p. 131.

15. Nous décidons de traduire « *pictorial* » par une simple transposition en français plutôt que par « image » ou « figuratif », pour préserver la spécificité de la notion de « *pictoriality* » pour laquelle aucun équivalent français n'est véritablement satisfaisant.

16. Russell 1927, p. 134.

Mais il en va de même pour la matière. Le sens commun regarde la matière extérieure comme cause de nos sensations. Nous reconnaissons le « même » morceau de matière en différentes occasions, par la similitude de ses qualités. Le paradigme auquel Russell recourt ici est le tour des trois cartes où l'escamoteur tente par des mouvements rapides de nous faire perdre le fil ; si nous pouvions rétablir la continuité spatio-temporelle des positions, nous aurions un critère d'identification sûr.

Un morceau de matière se manifeste par des qualités sensibles dont les variations sont continues, et dont les relations spatiales sensibles à d'autres séries continues de qualités de ce genre sont des fonctions continues du temps. [...] Dans la perspective du sens commun, il peut y avoir des difficultés dans certains cas [*gouttes dans un fluide, combustion, etc.*]. Mais ces cas peuvent être traités sur la base du sens commun lui-même. Un petit objet solide flottant dans l'eau montrera le sens du courant, et la fumée montre plus ou moins, ce qu'il advient de ce qui est consommé. L'élaboration ainsi suggérée conduit naturellement à la physique élémentaire et à la chimie, où l'on fait toujours l'hypothèse, au moins tacitement, que les objets concernés sont de la même sorte que les objets sensibles, mais relativement plus petits. Souvent ils peuvent être vus effectivement au microscope. Par l'imagination, nous continuons à attribuer à nos objets scientifiques, nos électrons et nos protons, cette continuité avec les objets sensibles, nous cachant ainsi à nous-mêmes le caractère hautement abstrait de nos assertions. En certaines circonstances, nous prenons conscience de cette abstraction ; mais cette impression ne se fait pas sentir comme elle le devrait, parce que l'imagination réaffirme ses droits dès que nous baissons la garde¹⁷.

Cette tension entre pictorialité et abstraction joue un rôle central dans la physique des années vingt, et notamment dans le passage du modèle de l'atome de Bohr à la mécanique matricielle de Heisenberg. Russell prend ici la mesure des débats théoriques relatifs au bien-fondé du principe de correspondance ou à la nécessité de promouvoir une approche plus austère débarrassée de tout élément pictorial. Rappelons que Max Planck avait à l'origine formulé l'hypothèse du quantum d'action pour rendre compte de la forme en cloche des courbes liant intensité du rayonnement et fréquence, issues des expériences sur le rayonnement du corps noir. Le raisonnement

17. Russell 1927, p. 135. C'est nous qui soulignons.

s'appuyait sur la représentation suivante : un fragment de matière peut être figuré par de petites particules qui oscillent plus ou moins rapidement selon qu'elles absorbent ou émettent de l'énergie. Sur la base de ce modèle, Planck suppose que l'énergie encapsulée par ces oscillateurs ne peut pas être émise continûment mais seulement par « paquets » dont la taille croît avec la fréquence de la lumière émise ou absorbée. C'est l'hypothèse du quantum d'action : l'énergie du rayonnement absorbé ou émis pour une fréquence ν est de la forme $E(\nu) = nh\nu$, c'est-à-dire qu'elle est un multiple entier du quantum d'action h . Par la suite, comme on sait, Bohr remarque que la constante de Planck a les dimensions physiques d'un moment cinétique¹⁸, ce qui le conduit à formuler l'hypothèse de la quantification du moment cinétique orbital dans le cadre d'un modèle de l'atome d'hydrogène avec orbites circulaires correspondant à certains rayons déterminés et niveaux d'énergie discrets.

Il est approprié et juste [estime alors Russell] d'utiliser une théorie « pictoriale » comme une aide dans l'investigation ; mais ce qui peut valoir comme connaissance déterminée est quelque chose de beaucoup plus abstrait. Et il est tout à fait possible que la vérité ne se

-
18. Rappelons que le moment cinétique d'une particule en mouvement est égal au produit vectoriel du vecteur position et de la quantité de mouvement, $j = \vec{q} \times \vec{p}$. En dérivant par rapport au temps, on obtient une expression de la variation du moment cinétique,

$$\frac{dj}{dt} = \frac{d\vec{q}}{dt} \times \vec{p} + \vec{q} \times \frac{d\vec{p}}{dt}$$

qui permet de préciser le sens physique de ce concept. On a en effet d'une part

$$\frac{d\vec{q}}{dt} \times \vec{p} = 0$$

car la vitesse apparaît de part et d'autre, et d'autre part

$$\vec{q} \times \frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{q} \times \vec{F}$$

d'après la seconde loi de Newton, si $\vec{F}$ est la force qui s'exerce sur la particule. On obtient par suite une relation simple :

$$\frac{dj}{dt} = \vec{q} \times \vec{F}$$

qui implique qu'en mécanique classique, le moment cinétique est constant si la particule se meut dans le champ d'une force centrale, ce dont découlent les lois de Kepler pour le mouvement planétaire. On raisonne alors de la manière suivante pour saisir le bien fondé de la remarque de Bohr. L'énergie E s'exprime en Joule, la fréquence ν en s^{-1} , donc la constante de Planck h s'exprime en J.s. Maintenant le moment cinétique $j = \vec{q} \times \vec{p}$ s'exprime en $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$, mais un Joule est l'énergie nécessaire pour déplacer le point d'application d'une force d'un Newton d'un mètre dans la direction de la force (N. m) et un Newton équivaut à un $kg \cdot m \cdot s^{-2}$, le quantum d'action a donc les dimensions physiques d'un moment cinétique.

prête pas à l'énoncé pictorial, mais seulement à l'expression en formules mathématiques. Telle est [...] la conception qui sous-tend ce que nous pourrions appeler la théorie de Heisenberg¹⁹.

Le passage du modèle de l'atome de Bohr à la théorie de Heisenberg procède d'un principe méthodologique qui impose de ne tenir compte dans la construction de la théorie que de ce qui est effectivement donné. Or les seuls éléments dont nous disposons pour élaborer notre connaissance des atomes, ce sont les fréquences et les intensités particulières de la lumière qu'ils émettent. Nous ne voyons jamais les fréquences du mouvement des électrons dans les orbites individuelles qui correspondent aux différents niveaux d'énergie. Plus encore, ces orbites, dans le modèle de Bohr, sont purement fictives. La grande idée de Heisenberg est de représenter la position q et la quantité de mouvement p par des matrices carrées constituées de grandeurs observables. Partant d'un mouvement orbital supposé donné, il est possible, grâce à l'analyse de Fourier, d'extraire des fréquences pures des variations périodiques de q et de p et de les représenter par des séries de coefficients de Fourier. Caractérisée à très grands traits, la démarche de Heisenberg procède en quelque sorte à l'inverse : les quantités ne sont plus représentées que par les matrices et leur sens pictorial est laissé de côté.

La théorie matricielle de l'électron est trop neuve [*précise toutefois Russell*] pour être déjà soumise au genre d'analyse logique que nous proposons... Cependant il est clair qu'elle affecte l'économie scientifique de la théorie en substituant aux mouvements réguliers simplement hypothétiques de l'atome de Bohr un ensemble de quantités représentant ce que nous connaissons réellement – à savoir les radiations qui émanent de la région où l'électron est supposé se trouver. Il est donc clair qu'il y a un immense progrès logique dans la construction d'une dynamique qui détruit la distinction entre mouvements quantifiés et non quantifiés, et traite tous les mouvements au moyen d'un ensemble uniforme de principes. Et l'abstraction plus grande de l'atome de Heisenberg comparé à l'atome de Bohr le rend préférable, puisque les éléments pictoriaux dans la théorie physique sont précisément ceux en lesquels on peut le moins placer notre confiance²⁰.

Mais qu'est-ce alors qu'un électron s'il faut abandonner l'idée même de localisation ? Ce n'est ni un simple point matériel, ni une région

19. Russell 1927, p. 26-27.

20. *Ibid.*, p. 46.

de l'espace, mais « quelque chose pour ainsi dire d'un type logique différent »²¹. Les développements de la théorie quantique semblaient ainsi largement conforter une conception de la science mettant l'accent sur le primat de la structure que Russell résume de manière frappante : « nous connaissons les équations, mais pas ce qu'elles veulent dire »²².

Auparavant, la conception d'une onde transverse dans l'éther semblait claire : l'éther était composé de particules, dont chacune pouvait se mouvoir de la manière requise. Mais aujourd'hui, l'éther s'est vidé de toute substance [*the aether is grown insubstantial*] et aucun mouvement ne peut lui être imputé en quelque sens que ce soit ; certainement peu s'aventureraient à le considérer comme composé de particules ponctuelles, comme le fluide homogène d'un manuel d'hydrodynamique. Ainsi l'onde lumineuse est devenue une structure en l'air, comme un arbre généalogique dont tous les membres sont imaginaires. Ceci illustre une nécessité lorsque l'on décrit une structure : les termes sont aussi importants que les relations, et nous ne pouvons nous satisfaire de termes que nous croyons fictifs²³.

Eddington avait, avant Russell, explicitement développé cette opposition entre structure et substance en affirmant que la tâche de la physique peut être adéquatement décrite comme une « quête de la structure plutôt que de la substance »²⁴. Par un jeu singulier d'emprunts croisés, il prétendait avoir pris conscience de l'importance de cette notion de structure dans le champ des sciences en lisant la philosophie mathématique de Russell²⁵. Mais si, pour Eddington, la promotion de la seule structure est intimement liée, comme nous allons le voir, au principe et à la méthode de l'identification tensorielle et constitue comme telle une sorte de dogme philosophique, l'orientation de pensée de Russell devait en revanche le conduire à questionner ce qu'il y a pour ainsi dire en-deçà de la structure.

21. *Ibid.*, p. 326.

22. *Ibid.*, p. 287.

23. *Ibid.*, p. 277.

24. Eddington 1923, § 18, p. 41.

25. Eddington (1921, p. 242.) cite un passage de l'*Introduction à la Philosophie Mathématique* de Russell à l'appui de cette réévaluation de la notion de structure : « On aurait pu éviter de nombreuses et longues discussions philosophiques si l'on avait bien vu le rôle important que joue la structure et la difficulté qu'il y a à aller au-delà. » Cf. Russell [1918] (1991), p. 129.

Tenseurs et propriétés intrinsèques de l'Univers

Eddington conçoit la réalité physique comme « synthèse des apparences » ou encore intégration de la plupart, voire de la totalité, des aspects possibles de la nature dans un schéma unique. Pensons à l'enrichissement graduel que représente le passage de l'univers de la vision monoculaire à celui de la vision binoculaire, puis à l'univers à trois dimensions. À chaque fois, l'observateur démultiplie les points de vue. Mais l'univers à quatre dimensions constitue un progrès supplémentaire parce qu'il réalise la combinaison de tous les aspects de l'univers pour un observateur qui peut prendre désormais toutes les vitesses uniformes possibles. Enfin l'univers riemanien intègre dans sa géométrie même tous les points de vue d'observateurs dont la vitesse est arbitraire. La construction mathématique d'une variété espace-temps ne suffit pas cependant pas à apporter une réponse pleinement satisfaisante au problème de la réalité physique. Si en effet les coordonnées d'espace et de temps qui nous permettent de repérer les corps les uns par rapport aux autres et d'effectuer des mesures dépendent toujours d'un système arbitrairement choisi, comment pouvons-nous dégager des propriétés objectives du monde physique ? La méthode des tenseurs est précisément ce qui nous permet de déterminer les conditions auxquelles il est possible d'imputer à un énoncé physique formulé dans un système de coordonnées donné, une signification indépendante des coordonnées. Weyl par exemple soutient ainsi que « le calcul tensoriel est l'instrument mathématique naturel pour l'expression des lois auxquelles les phénomènes naturels sont soumis »²⁶. Mais qu'est-ce qu'un tenseur ? Pour répondre à cette question, simplifions-la. Précisons d'abord ce que nous avons en vue lorsque nous parlons de vecteurs. Nous savons par exemple que la vitesse d'un point dans l'espace peut être considérée comme constituée de ses composantes horizontale, latérale et verticale dans un certain système de référence, et que si nous changeons de système de référence, nous altérons sans doute les composantes de la vitesse mais pas la vitesse elle-même ; par conséquent un vecteur est connu au moyen de ses composantes mais ne s'y réduit pas, en sorte qu'on pourrait le définir comme un ensemble de composantes auquel il faudrait ajouter certaines règles régissant leur trans-

26. Weyl 1922, § 5, p. 35.

formation²⁷. La théorie des tenseurs n'est rien d'autre qu'une généralisation de la théorie des vecteurs pour laquelle on autorise maintenant une débauche d'indices. Techniquement, on définira donc un tenseur comme un ensemble de composantes – par exemple les $T_{\alpha\beta\gamma}^{\lambda}$ – dans un système de coordonnées (x^i) donné, qui se transforment selon la loi générale suivante, lorsque l'on passe à un autre système de coordonnées $(\bar{x}^j)$:

$$\bar{T}_{\mu\nu\rho}^{\sigma} = \left(\frac{\partial x^{\alpha}}{\partial \bar{x}^{\mu}} \right) \left(\frac{\partial x^{\beta}}{\partial \bar{x}^{\nu}} \right) \left(\frac{\partial x^{\gamma}}{\partial \bar{x}^{\rho}} \right) \left(\frac{\partial \bar{x}^{\sigma}}{\partial x^{\lambda}} \right) T_{\alpha\beta\gamma}^{\lambda}$$

L'idée essentielle est simple : c'est la loi de transformation des composantes qui fait d'un système de quantités un tenseur. Quelles conséquences peut-on en tirer quant à l'objectivité de notre connaissance ? Nous pouvons concevoir les propriétés intrinsèques de l'univers quadridimensionnel de la relativité générale comme les propriétés qui sont indépendantes des coordonnées parce qu'invariantes par transformation de coordonnées. Un tenseur ne donne alors en lui-même la mesure d'aucune propriété intrinsèque du monde physique – sauf s'il s'agit de tenseurs scalaires – mais la forme de toute équation linéaire liant différents tenseurs est préservée par transformation de coordonnées et une telle équation tensorielle exprime donc une propriété intrinsèque de l'univers. La théorie des tenseurs est par conséquent l'outil mathématique approprié à la relativité générale. Le *principe de relativité* qui stipule que les lois de la physique sont les mêmes pour tous les observateurs prend alors la forme d'un *principe de covariance générale* qui suppose l'expression tensorielle des équations de champ.

Eddington interprète les invariants de la théorie de la relativité, à savoir l'intervalle d'espace-temps et la courbure, dans le sens d'un réalisme de l'espace-temps en leur conférant une signification absolue. Retraçons brièvement les étapes de son argumentation. Traditionnellement on oppose la force centrifuge à la force gravitationnelle, parce que la première n'existerait que pour un observateur en rotation. Mais si le critère qui permet de reconnaître un champ de forces artificiel est fourni par la possibilité de l'annuler, alors la gravitation serait tout autant artificielle que la force centrifuge, puisqu'elle

27. Si par exemple on double la longueur des vecteurs de la base, on divisera de moitié les composantes du vecteur. Dans le cas des tenseurs, on dira que les tenseurs sont covariants s'ils varient comme les vecteurs de base ou contravariants s'ils varient selon la transformation inverse. Par exemple, un tenseur à quatre indices $T_{\alpha\beta\gamma}^{\lambda}$ est contravariant d'ordre 1 et covariant d'ordre 3.

disparaîtrait pour un observateur en chute libre. La distinction entre forces fictives et forces réelles n'a donc aucun fondement, si ce n'est que la gravitation ne peut être annulée que localement alors que la force centrifuge peut l'être globalement. L'introduction de champs de gravitation dans l'Univers à quatre dimensions oblige donc à envisager les choses sous leur aspect infinitésimal : dans une région d'espace-temps suffisamment petite, on peut toujours supposer un système de coordonnées (l'observateur en chute libre) pour lequel la force disparaît et la valeur de l'intervalle d'espace-temps est la même que dans l'univers de Minkowski :

L'intervalle qui sépare deux événements rapprochés est une quantité qui possède une signification absolue dans la nature. La ligne d'Univers qui joint deux événements éloignés et qui a entre ces deux événements l'intervalle total maximum, possède également une signification absolue. De telles lignes d'Univers sont appelées des géodésiques ; elles peuvent se trouver décrites pratiquement, car ce sont les trajectoires des particules non troublées par des chocs matériels et le parcours de ces géodésiques nous fournit la méthode la meilleure pour étudier le caractère de la géométrie naturelle de l'Univers. Une méthode auxiliaire consiste à utiliser les règles et les horloges qui, si elles sont parfaitement libres, peuvent mesurer, ou du moins le croyons-nous, de petits intervalles d'après la formule

$$ds^2 = cdt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

[...] L'identité de ces deux méthodes pour déterminer la géométrie de l'Univers se trouve liée à un principe que nous devons maintenant énoncer, le *principe d'équivalence* : « Un champ de gravitation est rigoureusement équivalent à un champ de forces artificiel ; il est par suite impossible, dans toute région suffisamment petite de l'espace, de concevoir une expérience permettant de discerner ces deux champs l'un de l'autre »²⁸.

Le champ de gravitation n'est donc rien d'autre que le champ de forces mesuré. La métrique d'espace-temps $ds^2 = g_{ij}dx_i dx_j$ est composée de dix fonctions ou potentiels g_{ij} qu'Eddington représente sous forme de tableau²⁹ et qui prennent une valeur déterminée en chaque point d'espace-temps.

28. Eddington 1921, p. 94-95.

29. Le tableau est triangulaire parce qu'on a $g_{ij} = g_{ji}$.

$$\begin{array}{cccccccc}
g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14} & -1 & 0 & 0 & 0 \\
& g_{22} & g_{23} & g_{24} & & -1 & 0 & 0 \\
& & g_{33} & g_{34} & & & -1 & 0 \\
& & & g_{44} & & & & 1
\end{array}$$

Si les g_{ij} coïncident en tout point avec les potentiels galiléens – ceux de droite – alors la métrique est dite pseudo-euclidienne et on a affaire à l'espace-temps de Minkowski, c'est-à-dire un espace-temps dépourvu de matière et de gravitation où les géodésiques sont des lignes droites. Dans le cas général, la géométrie spécifique de l'espace-temps est renfermée dans ces dix valeurs, envisagées à transformation de coordonnées près³⁰.

Si nous nous représentons la région d'espace-temps occupée par le champ de gravitation de la Terre comme une ride sur notre Univers à quatre dimensions, nous remarquerons aussitôt que nous ne pouvons pas dire que cette ride se trouve en un point déterminé : elle est quelque part dans les environs de ce point. En un point donné, nous pouvons toujours effacer la ride par un changement de système de référence, mais la singularité va se réfugier quelque part ailleurs. C'est ce que firent les habitants du projectile de Jules Verne³¹ ; ils aplanirent la ride à l'intérieur du projectile, de sorte qu'il leur fut impossible d'y déceler le moindre champ de force ; mais par là même, ils accentuèrent le défaut ailleurs et c'est ainsi qu'ils auraient trouvé, par exemple, un accroissement du champ de gravitation (relativement à eux) dans la région de la Terre opposée à la leur. Ce qui détermine l'existence de la ride, ce ne sont pas les valeurs de g , ou ce qui revient au même le champ de force à l'endroit où elle se trouve, c'est la manière dont ces valeurs en un point sont liées aux valeurs en d'autres points voisins, c'est le gradient des fonctions g et plus particulièrement le gradient du gradient³².

Le champ de gravitation n'a donc pas de caractère absolu, on peut l'annuler par l'accélération de l'observateur ou par un changement du système de coordonnées ; en d'autres termes, la gravitation est relative, mais la courbure de l'Univers présente un caractère absolu.

30. Les g_{ij} sont des tenseurs covariants d'ordre 2 :

$$\bar{g}_{kl} = \left(\frac{\partial x^i}{\partial \bar{x}^k} \right) \left(\frac{\partial x^j}{\partial \bar{x}^l} \right) g_{ij}$$

31. Eddington fait référence au livre de Jules Verne, *Autour de la Lune* [1869].

32. Eddington 1921, p. 107.

Principe d'identification et désubstantialisation de la matière

Sur la base de ces analyses, Eddington propose une reconstruction rationnelle de la démarche théorique qui conduisit Einstein à ses célèbres équations de champ, et en tire une interprétation philosophique originale de la théorie de la relativité. Partons de questions précises. Tous les genres d'espace-temps sont-ils possibles dans la nature ? Pourrions-nous choisir de donner des valeurs parfaitement arbitraires aux dix potentiels g ? Ou bien l'univers physique nous contraint-il en orientant ce choix ? Pour trouver les équations du champ gravitationnel, il faut déterminer quelle est la géométrie naturelle parmi toutes celles qui sont possibles mathématiquement. Y a-t-il alors des critères à mettre en œuvre pour sélectionner la bonne géométrie de l'espace-temps ? Selon Eddington, c'est ce problème qu'Einstein s'est attaché à résoudre et deux idées essentielles l'ont guidé dans cette entreprise.

- (1) Les propriétés intrinsèques de la géométrie de l'espace-temps doivent pouvoir être exprimées par des propriétés des fonctions g_{ij} , qui sont indépendantes du choix du référentiel. Les formules qui caractérisent la géométrie naturelle doivent donc présenter un caractère tensoriel (principe de covariance générale).
- (2) Le fait que localement, dans une région suffisamment petite, à grande distance de toute matière attirante, l'espace-temps euclidien existe dans la nature. Par conséquent, toute équation tensorielle des g_{ij} , doit valoir en particulier pour les valeurs galiléennes, qui correspondent à l'espace-temps euclidien (principe d'équivalence).

La démarche consiste alors à partir du particulier pour s'élever vers le général par un processus de géométrisation qui libère des conditions arbitraires en levant les restrictions inhérentes à notre appréhension des choses. Les différents paliers de généralisation correspondent aux différentes étapes d'une simplification des tenseurs qui suppose dès le départ tout l'arsenal mathématique des tenseurs construits formellement à partir du tenseur métrique fondamental g_{ij} . À certains égards, la reconstruction d'Eddington suit donc le mouvement inverse du développement historique concret en partant des tenseurs auxquels Einstein n'est parvenu qu'au prix d'efforts considérables dans sa recherche d'une théorie satisfaisante

qui puisse donner corps à l'équivalence entre inertie et gravitation. Le pas décisif pour Einstein fut, comme on sait, d'interpréter les symboles de Christoffel Γ_{ij}^k considérés jusque-là comme de simples outils formels de la théorie des invariants différentiels ou de la géométrie différentielle³³, comme les composantes du champ gravitationnel, en dépit du fait qu'ils ne présentent pas de caractère tensoriel. C'est ce qui lui permit de donner un sens physique à l'équation des géodésiques³⁴

$$\frac{d^2 x_\mu}{ds^2} + \Gamma_{\alpha\beta}^\mu \frac{dx_\alpha}{ds} \frac{dx_\beta}{ds} = 0$$

Supposons que les géodésiques forment un réseau de lignes couvrant toute la variété espace-temps et qu'on puisse assigner en tout point une base de vecteurs infinitésimaux ; alors intuitivement, ces symboles de Christoffel Γ_{ij}^k , construits à partir des g_{ij} et de leurs dérivées, concentrent en quelque sorte toute l'information nécessaire pour déterminer la manière dont ces vecteurs de base sont modifiés lorsque l'on passe d'un point à un point voisin. Ces symboles Γ_{ij}^k permettent à leur tour de construire un nouveau tenseur

$$R_{\mu\nu\rho}^\sigma$$

appelé tenseur de Riemann-Christoffel, ou encore tenseur de courbure³⁵, obtenu en formulant mathématiquement la variation d'un vecteur le long d'une boucle infinitésimale, et c'est de ce dernier tenseur que part Eddington pour reconstruire à priori les équations de champ.

Du fait du principe d'équivalence, on peut donc, estime-t-il, partir du cas simple où le champ de gravitation s'annule. La condition particulière qui exprime que l'espace-temps est euclidien correspond alors à l'équation tensorielle

33. Scholz 1999, p. 71.

34. *Ibid.* Cf. le passage cité par Scholz : « Nous faisons maintenant l'hypothèse hautement plausible que ce système généralement covariant d'équations continue à déterminer le mouvement du point dans le champ gravitationnel même dans le cas où il n'existe aucun référentiel K_0 par rapport auquel la relativité restreinte s'applique dans des régions finies [...]. Si les Γ_{ij}^k s'annulent, alors le point se meut d'un mouvement rectiligne et uniforme ; par conséquent ces quantités déterminent la déviation du mouvement par rapport à l'uniformité. Ce sont les composantes du champ gravitationnel. » Einstein, *Die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie*, Leipzig, Johann Ambrosius Barth, 1916.

35. Sur les liens entre tenseur de courbure et courbure riemannienne, cf. Jammer 2008, p. 171-172.

$$(1) \quad R_{\mu\nu\rho}^{\sigma} = 0 \quad 20 \text{ conditions}$$

Cette équation énonce que toutes les composantes³⁶ du tenseur de Riemann-Christoffel s'annulent, mais se ramène en fait à vingt équations indépendantes qui correspondent au cas où il n'y a pas de gravitation et où toute masse attirante est rejetée à l'infini. Cette condition particulière offre à présent un point d'appui à partir duquel nous pouvons nous élever vers le cas général. Une possibilité aurait pu être de ne retenir qu'une partie de ces équations pour former une condition plus générale, mais elles sont toutes étroitement solidaires, et le caractère tensoriel, c'est-à-dire l'indépendance par rapport aux systèmes de coordonnées, suppose qu'on ne rompe pas l'unité qui les lie. Les ressources du calcul tensoriel permettent toutefois d'aller de l'avant. On peut en effet former un nouveau tenseur (le tenseur de Ricci) à partir de $R_{\mu\nu\rho}^{\sigma}$ en utilisant le procédé dit de contraction qui consiste à identifier l'un des indices du haut avec l'un des indices du bas³⁷, c'est-à-dire dans notre cas

$$R_{\mu\nu} = R_{\mu\nu\lambda}^{\lambda} = R_{\mu\nu 1}^1 + R_{\mu\nu 2}^2 + R_{\mu\nu 3}^3 + R_{\mu\nu 4}^4$$

On obtient ainsi un second groupe de conditions plus générales sans cependant sacrifier le caractère tensoriel

$$(2) \quad R_{\mu\nu} = 0 \quad 6 \text{ conditions}$$

Ces équations expriment l'état d'une région du continuum physique ne contenant ni matière, ni énergie électromagnétique, mais située dans le voisinage de ces formes d'énergie. En formant alors un tenseur scalaire R , appelé la courbure scalaire³⁸, à partir des $R_{\mu\nu}$, on obtient une condition plus générale encore

$$(3) \quad R = 0 \quad 1 \text{ condition}$$

qui caractérise l'état d'une région ne contenant ni matière, ni électrons (énergie liée), mais contenant des champs électromagnétiques. Si cette condition n'est pas remplie, ou si la contradictoire est vérifiée, on obtient

36. Le tenseur a quatre indices, il comprend donc $4^4 = 256$ composantes, mais la plupart sont liées les unes aux autres, aussi le nombre d'équations indépendantes est-il beaucoup plus réduit.

37. La convention de sommation stipule qu'un symbole avec indice redoublé $R_{\mu\nu\lambda}^{\lambda}$ a valeur de somme.

38. Techniquement, la courbure scalaire s'obtient ainsi $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$.

qui caractérise l'état d'une région contenant de la matière continue. Considérée dans son ensemble, la démarche associe, d'une façon singulière, géométrisation, généralisation et spécification. D'un côté, on va du particulier au général, mais la généralité que l'on vise est du même coup adéquate à la variété espace-temps. La chose pourrait paraître paradoxale au premier abord, mais elle s'éclaire si l'on songe au fait qu'Eddington distinguait nettement deux genres de généralisation, comme le montre l'apologue de l'ichtyologiste³⁹ qui explore le fond des océans avec son filet. Il imagine un ichthyologiste qui, après avoir examiné le résultat de la pêche, formulerait deux lois générales : (1) aucune créature marine n'a moins de deux pouces de long ; (2) toutes les créatures marines ont des branchies. À qui contesterait la première loi en suggérant qu'il pourrait bien y avoir des poissons plus petits mais que les mailles du filet sont trop grandes pour les prendre, l'ichtyologiste répond que ce qu'on ne peut pas prendre est hors de portée de notre connaissance ichthyologique et qu'une science de ce qu'on ne peut pas prendre n'est pas de l'ichtyologie mais de la métaphysique. La première généralisation est donc sûre, là où la seconde est susceptible de révision.

Les généralisations qui peuvent être obtenues épistémologiquement ont une certitude qui est refusée à celles qui ne peuvent être obtenues qu'empiriquement⁴⁰.

Eddington devait nommer plus tard « subjectivisme sélectif » cette philosophie de la physique qui donne un sens renouvelé à la notion d'*a priori*, dans la mesure où l'équipement conceptuel de la physique sélectionne comme objectifs certains traits généraux qu'il confère à la réalité empiriquement donnée.

Pour obtenir la loi générale du champ de gravitation, Einstein prend comme modèle l'équation de Poisson en mécanique classique, $\nabla^2\phi = -4\pi k\rho$, laquelle, très grossièrement, exprime l'idée que le champ de gravitation issu d'un potentiel ϕ est suscité par la densité de matière pondérable. L'analogie devait donc conduire Einstein à substituer à la grandeur scalaire, densité de masse ρ , une grandeur tensorielle, appelée « tenseur de densité d'énergie », et à chercher une relation tensorielle liant les propriétés géométriques

39. Eddington 1938, p. 16-18 ; Merleau-Ponty 1965, p. 22-23.

40. Eddington 1938, p. 19.

du champ aux propriétés physiques de la matière. C'est ainsi qu'il parvint aux équations de la relativité générale

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -8\pi T_{\mu\nu}$$

Mais, comme on le sait, celles-ci peuvent être interprétées de deux manières différentes⁴¹. Si on les lit de droite à gauche, on peut être enclin à considérer que l'énergie détermine la géométrie, ou à tout le moins la modifie. Mais nous pouvons aussi les lire de gauche à droite et penser qu'une fois la géométrie donnée, c'est-à-dire une fois que les composantes du tenseur métrique sont fixées, la quantité d'énergie est par là même définie. Einstein jugeait cette situation insatisfaisante et la comparait à une « construction dont une aile serait de marbre fin et l'autre aile de bois de mauvaise qualité »⁴². Tout le problème est alors de savoir ce qui doit primer de la représentation phénoménologique de la matière correspondant à la partie droite de l'équation ou de la représentation mathématique de la partie gauche.

L'interprétation que propose Eddington consiste à envisager résolument les équations de champ comme une *définition* de la matière. Ce renversement de perspective est le propre de la « construction du monde » [*« world-building »*]⁴³ qu'autorise la méthode tensorielle : il s'agit de constituer par les mathématiques pures un équivalent abstrait qui ait toutes les propriétés de la matière. Eddington introduit ainsi la proposition qui énonce que la divergence du tenseur d'Einstein est nulle comme théorème fondamental de la mécanique parce qu'elle permet cette identification.

*La divergence de $G_{\mu}^{\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu}^{\nu} G$ est identiquement nulle. En trois dimensions, le fait que la divergence s'annule est une condition de la continuité du flux, par ex. en hydrodynamique [...] Si on ajoute une coordonnée de temps, cela devient la condition de conservation ou de permanence. On s'apercevra à quel point est importante pour une théorie du monde matériel la découverte d'un tenseur de monde qui est permanent de façon inhérente*⁴⁴.

41. Zahar 1980, p. 14.

42. Passage cité par Zahar 1980, *ibid.*

43. Eddington 1923, § 103, p. 237.

44. *Ibid.*, § 52, p. 115. Nous nous référons à l'édition anglaise et traduisons nous-mêmes les passages cités. Eddington note le tenseur d'Einstein en choisissant d'autres lettres pour le tenseur de Ricci et la courbure scalaire et en rehaussant un des deux indices.

Les mathématiques fournissent donc une base de permanence et c'est tout ce dont nous avons besoin pour construire mathématiquement le monde, car fondamentalement, comme le dit Eddington, la matière est un « indice » et non une « cause ».

Le fait que la divergence de T_μ^ν s'annule pointe vers une identification avec $G_\mu^\nu - \frac{1}{2} g_\mu^\nu G$ qui s'annule aussi identiquement [...]. Nous arrivons ainsi à la loi de gravitation pour la matière continue mais avec une justification différente. On fait désormais appel au principe d'identification. Notre théorie déductive part de l'intervalle [...], dont on tire immédiatement le tenseur $g_{\mu\nu}$. Par les mathématiques pures, nous dérivons d'autres tenseurs $G_{\mu\nu}$, $B_{\mu\nu\sigma\rho}$ [*i. e. le tenseur de Riemann-Christoffel à l'abaissement d'un indice près*] et si nécessaire, d'autres tenseurs plus compliqués. Ceux-ci constituent le matériau de construction du monde [*our world-building material*]; et le but de la théorie déductive est de construire à partir de cela un monde qui fonctionne de la même manière que le monde physique connu. Si nous réussissons, la masse, la quantité de mouvement, la tension, etc. doivent être les noms ordinaires de certaines quantités analytiques dans la théorie déductive [...]. Si la théorie fournit un tenseur $G_\mu^\nu - \frac{1}{2} g_\mu^\nu G$ qui se comporte exactement de la même manière qu'on observe que se comporte le tenseur récapitulant la masse, la quantité de mouvement et la tension de la matière, il est difficile de voir comment on pourrait exiger de lui davantage⁴⁵.

L'identification de la matière au tenseur correspond ainsi à une sorte de désubstantialisation de la matière dans la mesure où les caractères traditionnels de la substance matérielle sont désormais ressaisis dans une construction mathématique.

Il paraissait possible au début des années vingt de prolonger et de parfaire cette démarche de géométrisation. Sans doute le processus de généralisation conduisant aux équations de champ gravitationnel avait-il consisté à écarter toute hypothèse non nécessaire dans la saisie conceptuelle du donné, mais il restait cependant une hypothèse arbitraire dans l'appareil conceptuel de la physique. Jusqu'ici en effet on avait supposé non seulement que l'intervalle d'espace-temps ds était invariant pour tous les observateurs quel que soit leur mouvement et le système de coordonnées qu'ils utilisent, mais aussi qu'il était possible de comparer deux intervalles d'espace-temps distants l'un de l'autre. Pour donner un sens physique à cette comparaison, on supposait donc implicitement qu'on

45. *Ibid.*, § 54, p. 119.

pouvait pour ainsi dire transporter l'un des intervalles de proche en proche jusqu'à l'amener exactement au point où se trouve le second, or rien n'autorise à admettre sans autre examen que les étalons de mesure ne sont pas affectés par ce transport. Nous devrions au contraire considérer toutes les étapes intermédiaires de ce transport et ne pas réintroduire en quelque sorte subrepticement l'action à distance dans la comparaison des intervalles. Telle est l'idée essentielle de la géométrie infinitésimale de Weyl.

Localement, en chaque point P de l'espace-temps, on peut toujours mesurer des intervalles dans une direction quelconque. La difficulté ne se présente que lorsqu'il s'agit de mesurer des intervalles qui sont dans le voisinage d'un point Q distant de P . On transporte par suite l'étalon de mesure de P en Q , mais rien ne garantit que la longueur de l'étalon ne dépende pas du chemin suivi pour aller de P à Q . La méthode consiste alors à fixer une unité de longueur, une jauge, en chaque point de l'espace-temps, de sorte que la comparaison des longueurs puisse dépendre du chemin suivi. Tout comme les systèmes de coordonnées, les systèmes de jauges choisis sont parfaitement arbitraires, mais peuvent néanmoins exprimer des propriétés intrinsèques de l'Univers. Si l'on déplace un étalon d'un point P à un point Q , la mesure de la variation en longueur qu'il subit s'obtient ainsi par comparaison de l'étalon avec les différentes jauges successivement rencontrées sur le parcours. Supposons à présent que l'on transporte un étalon de longueur l le long d'un élément infinitésimal (dx_v) du point P à un point P' infiniment voisin, et notons dl la variation que subit l'étalon. On peut supposer que la variation de longueur dl est proportionnelle à la longueur choisie l , de sorte que l'on ait $dl = \phi.l$.

Mais ce coefficient de variation ϕ ne dépend ni de l'étalon choisi, ni non plus de la direction d'un tel étalon. Par conséquent, ϕ ne peut dépendre que des déplacements infinitésimaux (dx_v) , si nous faisons l'hypothèse que la valeur de ϕ est indépendante de l'ordre dans lequel ceux-ci sont effectués, c'est-à-dire si nous supposons que localement la mesure de l'intervalle ne dépend pas du chemin emprunté. Nous avons donc

$$\phi = \phi_1 dx_1 + \phi_2 dx_2 + \phi_3 dx_3 + \phi_4 dx_4$$

Weyl parvient à donner une signification physique à ces quatre coefficients en les *identifiant* aux potentiels électromagnétiques. Tentons de préciser le sens de cette décision. Dans le cas général, le transport d'un vecteur d'un point P de l'espace-temps à ce même point P le long d'une boucle fermée modifie le vecteur en

direction mais aussi en longueur. Si la direction n'est pas préservée, on dit que la direction n'est pas intégrable, et la non-intégrabilité de la direction caractérise le champ gravitationnel, si c'est la longueur qui est modifiée, on dit que c'est la longueur qui n'est pas intégrable, et la non-intégrabilité de la longueur caractérise le champ électromagnétique. Ainsi Weyl envisageait-il de fondre les lois de la gravitation et de l'électromagnétisme dans une seule géométrie caractérisée conjointement par les dix fonctions de potentiel g_{ij} et les quatre fonctions ϕ_i , et « le rêve de Descartes d'une physique purement géométrique sembl[ait] se réaliser d'une manière toute naturelle et imprévue »⁴⁶.

Uniformité de la nature

Russell reconnaît dans le principe d'identification la caractéristique essentielle de la physique moderne mais ne se satisfait pas du renversement de perspective qui lui est associé.

Approximativement, on peut dire que la matière telle qu'elle est conçue par le sens commun se conserve ; partout où elle semble être détruite ou créée, nous pouvons trouver une forme d'explication qui rend compte de ces apparences. Par suite, à titre d'idéal suggéré par les faits empiriques, nous adoptons la conception selon laquelle la matière est indestructible. *Nous renversons alors notre point de vue, et en partant de la formule pour l'intervalle, nous construisons une quantité mathématique qui est indestructible. Cela, disons-nous, nous l'appellerons « matière »* ; et rien de mal ne peut venir de cette manière de faire. Mais à chaque fois que nous procédons ainsi, nous élargissons le fossé entre la physique mathématique et l'observation et nous augmentons la difficulté qu'il y a à construire un pont entre elles⁴⁷.

Russell refuse par conséquent l'interprétation philosophique d'Eddington qui consiste à purement et simplement transférer la substance de la matière permanente traditionnelle au tenseur.

Le fait que ce soit ce tenseur particulier [*i.e.* $G_\mu^\nu - \frac{1}{2}g_\mu^\nu G$] qui soit susceptible d'être reconnu par nous n'est pas accidentel. C'est parce que sa divergence s'annule – parce qu'il satisfait la loi de conservation – qu'il remplit la condition première pour être reconnu comme

46. Weyl 1922, § 35, p. 249.

47. Russell 1927, p. 137. C'est nous qui soulignons.

substantiel. Si c'est notre lot d'être environnés par un monde perceptuel, nous devons reconnaître comme substance ce qui a un élément de permanence. Nous pouvons ne pas être capables d'expliquer comment l'esprit reconnaît comme substantiel le tenseur de monde $G_\mu^\nu - \frac{1}{2}g_\mu^\nu G$, mais nous pouvons voir qu'il ne pourrait pas bien reconnaître quelque chose de plus simple. Il y a sans doute des esprits qui n'ont pas cette prédisposition à regarder comme substantielles les choses qui sont permanentes ; mais nous les enfermons dans des asiles de fous⁴⁸.

Dans la perspective d'Eddington, nous partons de l'intervalle d'espace-temps ds pour reconstruire mathématiquement les propriétés de la matière. Mais qu'est-ce au juste que le ds ? Russell signale à cet égard une difficulté réelle que ne doit pas masquer une présentation logique de la théorie de la relativité. Si le ds est sans doute primitif du point de vue de la structure déductive, du point de vue empirique en revanche, ce même intervalle infinitésimal d'espace-temps s'obtient en intégrant de manière complexe un ensemble de données empiriques. Nous n'avons en effet aucune connaissance a priori des $g_{\mu\nu}$ qui entrent dans la formule du ds^2 , bien au contraire nous ne déterminons leurs valeurs que sur la base d'observations. On peut donc envisager la théorie physique de deux points de vue selon Russell : le point de vue déductif et le point de vue inductif et l'articulation des deux est loin d'être claire. Du point de vue déductif, la mesure se fonde sur l'intégration du ds , mais dans la pratique, la valeur des $g_{\mu\nu}$ ne peut être fixée que par des mesures concrètes au voisinage d'une région donnée. Faire du ds quelque chose de primitif revient donc à occulter la base de continuité concrète sous-jacente à la variété espace-temps.

Or c'est précisément l'exigence de rendre compte de cette uniformité fondamentale de la nature qui guide l'interprétation que Whitehead propose de la théorie de la relativité.

[...] notre expérience requiert et exhibe une base d'uniformité, et [...] dans le cas de la nature, cette base se montre elle-même comme l'uniformité de relations spatio-temporelles. Cette conclusion exclut entièrement l'hétérogénéité désinvolte de ces relations qui sont l'essentiel de la dernière théorie d'Einstein [la relativité générale]⁴⁹.

48. Eddington 1923, § 54, p. 120.

49. Whitehead 1922, p. V. Nous nous référons à l'édition anglaise et traduisons nous-mêmes les passages cités.

La tâche d'une philosophie de la nature qui serait adossée à la théorie de la relativité consisterait alors, selon Whitehead, à penser à nouveaux frais le « caractère relationnel de la nature » [*relatedness of nature*] mis en pièce par le scepticisme de Hume. La variété espace-temps ne doit donc pas être conçue comme collection de points d'espace-temps disjoints les uns des autres.

La nature se présente elle-même à notre imagination comme composée de toutes ces entités qui doivent se trouver quelque part à un moment donné. Les tigres à dents de sabre sont une partie de la nature parce que nous croyons que des tigres à dents de sabre rôdaient en quête d'une proie quelque part à une certaine époque. Ainsi une signification essentielle d'un facteur de la nature consiste dans le fait qu'il fasse référence à quelque chose qui se produit dans le temps et l'espace. Je donne le nom d'« événement » à une telle production spatio-temporelle. Un événement n'implique en aucune façon un changement rapide ; l'endurance d'un bloc de marbre est un événement. La nature se présente elle-même à nous comme étant essentiellement un devenir, et n'importe quelle portion limitée de la nature qui préserve le plus complètement le caractère concret qui s'attache à la nature elle-même est aussi un devenir ; c'est ce que j'appelle un événement. Par là, je n'entends pas une simple portion d'espace-temps. Un tel concept est une abstraction qui se présente à un stade ultérieur. Je veux dire une partie du devenir même de la nature, colorée de toutes les nuances de son contenu.

Ainsi la nature est-elle un devenir d'événements qui sont mutuellement significatifs de sorte qu'ils forment une structure systématique. Nous exprimons le caractère de cette structure systématique d'événements en termes d'espace et de temps. Ainsi espace et temps sont-ils des abstractions à partir de cette structure⁵⁰.

Techniquement, Whitehead cherche à caractériser cette structure d'événements sous-jacente à la variété espace-temps en développant un calcul tensoriel indépendant du ds . Toute la théorie procède de l'exigence de maintenir une distinction nette entre géométrie et physique, car si la seconde est la science des relations contingentes, la première doit exprimer le « caractère relationnel uniforme » de la nature. Cette position théorique le conduit à refuser l'incorporation de la gravitation à la géométrie de l'espace-temps ; car en effet en imposant dès le départ une structure métrique – les $g_{\mu\nu}$ – à la variété espace-temps, « nous ne connaîtrions rien jusqu'à ce que

50. *Ibid.*, p. 21.

nous connaissons tout »⁵¹. De ce fait Whitehead propose une interprétation alternative de la théorie de la relativité qui rend compte des chemins d'espace-temps en supposant la géométrie euclidienne et les champs de force, plutôt que les géodésiques d'une géométrie de monde. Entre l'une et l'autre de ces interprétations, Russell ne tranche pas dogmatiquement, mais défend tout au contraire une sorte de conventionnalisme en déclarant que le choix est affaire de convenance et non de vérité. S'il adopte l'interprétation d'Einstein pour des raisons de type « logico-esthétique », il dénonce l'abstraction des « tenseurs substantiels » d'Eddington mais retient de Whitehead l'idée centrale d'un « continuum d'événements »⁵² sous-jacent à la variété espace-temps.

Des percepts aux événements

Pour conférer un contenu de réalité aux constructions symboliques de la physique, il est donc nécessaire selon Russell de rétablir une certaine forme de continuité qui les rattache au monde de la perception. La physique entière, estime-t-il, s'effondrerait comme un château de cartes, d'un point de vue épistémologique, s'il s'avérait impossible d'établir que les percepts ont des causes externes⁵³. La théorie causale de la perception se présente par conséquent comme une composante essentielle de la philosophie de la physique et s'organise autour de deux idées principales :

- (1) la perception ne donne pas une connaissance directe des objets extérieurs ;
- (2) les percepts ont des causes externes au sujet desquelles quelque chose peut être inféré des percepts eux-mêmes.

Mais qu'est-ce au juste qu'un percept ? Russell opte pour une schématisation et une objectivation des percepts au sens où sont désormais pris en compte des analogues non mentaux de la perception : plaque photographique impressionnée en un lieu donné, enregistrement sur bande magnétique, etc. Il y a donc non seulement des percepts que je ne perçois pas, qu'ils soient liés aux corps d'autres personnes ou simplement virtuels comme dans le cas de tels ana-

51. Whitehead 1922, p. 29-30.

52. Russell 1927, p. 80.

53. *Ibid.*, p. 197.

logues non mentaux, mais aussi des événements causalement corrélés aux percepts et relativement auxquels nous ne savons pas s'ils sont perçus ou non. La théorie russellienne de la perception se démarque à la fois de tout solipsisme (« *il n'y a que mes percepts* ») et de tout phénoménalisme (« *il n'y a que des percepts, ceux que je perçois et ceux que je ne perçois pas mais que perçoivent ou percevraient d'autres esprits ou dispositifs dans certaines circonstances* »).

Suivons le raisonnement censé justifier l'abduction des percepts aux événements. Nos percepts seuls ne suffisent pas à déterminer le cours de la nature, nous dérivons des lois causales de l'observation fine, et nous préservons ces lois causales en inventant des choses « idéales » lorsque celles-ci sont mises à mal, mais il n'y a aucune raison de supposer que ces éléments idéaux soient de simples fictions dépourvues de toute réalité. Cette conception ne saurait évidemment faire l'objet à proprement parler d'une démonstration, mais elle doit être acceptée comme le sont toutes les conceptions scientifiques parce que ce qu'elle implique est en accord avec ce qui est perçu et l'unifie.

Mais la partie décisive de l'argument est la possibilité d'inférer de la structure à partir des percepts. Russell montre que cette inférence dépend de certains postulats, en particulier de la supposition qu'il y a une similarité de structure entre la cause et l'effet, lorsque toutes deux sont complexes. Deux relations P et Q sont dites similaires s'il y a une relation « *one-one* » entre les termes de leurs domaines, c'est-à-dire telle que lorsque deux termes ont la relation P , les termes qui leur sont corrélés ont la relation Q , et vice-versa. La similarité s'applique non seulement aux relations à deux termes mais aussi à tous les autres types de relations n -adiques et deux relations similaires ont même structure. Rappelons que pour Russell, les propriétés logiques des relations sont les propriétés qui peuvent s'exprimer en termes purement logiques (par exemple, la transitivité pour une relation binaire, la propriété d'engendrer un espace euclidien pour une relation ternaire [*between*], etc.) Le fait fondamental qui rend possible une connaissance de type structural est alors le suivant : « lorsque deux relations ont la même structure, toutes leurs propriétés logiques sont identiques »⁵⁴.

Les inférences qui vont des percepts à leurs causes ont pour l'essentiel affaire à des propriétés logiques. Ainsi les relations spatiales que la physique suppose entre les objets en leur assignant des

54. *Ibid.*, p. 255.

coordonnées ne seraient pas identiques aux relations qui lient entre eux nos percepts mais leur correspondraient toutefois en sorte que les propriétés logiques de ces relations soient préservées. Des différences dans les percepts permettraient ainsi d'inférer des différences dans les stimuli. Prenons un exemple. On représente la position des objets en physique par des coordonnées polaires, *i.e.* deux coordonnées angulaires pour la direction et un rayon vecteur pour la distance ; il se pourrait alors très bien par exemple que les deux coordonnées angulaires correspondent aux sensations musculaires de rotation de la tête selon un axe vertical et horizontal, tandis que l'évaluation des distances correspondrait aux sensations musculaires binoculaires liées à l'ajustement de l'image rétinienne. Et le même genre de correspondance vaudrait pour les couleurs, les sons, etc. Plus généralement, toute notre connaissance de la physique serait mathématique ou encore structurale, parce que les propriétés non mathématiques du monde physique ne peuvent pas être inférées à partir de la perception.

Pour mieux cerner la structure de cette inférence, il faut substituer à la notion de relation *one-one*, la notion de relation *many-one*. Nous supposons en effet que des percepts différents ont des stimuli différents, mais des percepts indiscernables peuvent avoir des stimuli différents, et c'est ce qui rend la construction de théories en physique toujours précaire.

Nous pouvons construire des théories qui s'ajustent exactement aux faits connus, mais nous ne pouvons jamais être sûrs que d'autres théories ne conviendraient pas tout aussi bien. [...] La raison fondamentale de cette incertitude qui demeure même si nous supposons tous les canons de l'inférence scientifique, tient au fait que notre relation *S* qui connecte l'objet physique au percept, est *many-one* et non *one-one*⁵⁵.

Regardons les choses de plus près. La « connaissance de la structure » est pour une part obtenue par l'analyse des percepts, et dépend pour une autre part d'inférences qui mettent en jeu des entités non perçues. Certaines relations sont en effet « perçues » ou « perceptuelles », par exemple la relation « avant-après », la simultanéité, diverses relations spatiales à l'intérieur du champ visuel, etc. Aussi la question est-elle plutôt de savoir comment nous pourrions acquérir une connaissance de type structural lorsque les relations en cause

55. Russell 1927, p. 256.

ne sont pas immédiatement perçues. Comme le note Russell, certains principes généraux nous guident lorsque nous inférons de la structure à partir des percepts : (1) la similitude exacte des percepts est transitive ; (2) l'indiscernabilité des percepts est non transitive, la différence entre deux percepts A et C supposée perceptible peut en effet être composée des différences entre A et B d'une part et B et C d'autre part, toutes deux imperceptibles ; enfin et surtout (3) la règle méthodologique obtenue par contraposition de la maxime « même cause, même effet », à savoir « effets (perceptibles) différents, causes (imperceptibles) différentes ».

Maintenant, la structure ainsi inférée et progressivement enrichie en faisant jouer concurremment ces trois principes n'est-elle qu'une pure construction symbolique ou bien retient-elle quelque chose de la teneur de réalité de la perception. Le processus de désubstantialisation de la matière conduit-il à renoncer à toute forme de réalisme ? Comment conférer de la réalité aux théories physiques si l'on fait le deuil de la substance permanente ? Peut-on se contenter d'une structure sans substance ? La réponse suppose une clarification des termes mêmes de la question. Selon Russell, le problème de la substance peut être compris de trois manières différentes, comme problème logique, physique et épistémologique.

- (1) Le premier problème relève de la philosophie pure : est-ce que la notion de « substance » est une « catégorie », c'est-à-dire s'impose-t-elle à nous du fait de la nature générale des faits ou de la connaissance ?
- (2) Le second concerne l'interprétation de la physique mathématique : est-il nécessaire ou utile d'interpréter les formules de la physique en termes d'entités permanentes dont les états et les relations sont changeants ?
- (3) Le troisième problème enfin est épistémologique et concerne la relation de la perception au monde physique.

Nous avons vu quelle était la position de Russell concernant les deux derniers points. En revanche, comprise dans le premier sens, la question de la substance le conduit à examiner l'influence de la structure du langage sur la structure de la pensée. C'est l'une des thèses le plus souvent défendues par Russell ; l'analyse de la proposition en sujet et prédicat, ou en sujets et relation, présente dans la plupart des langues, induirait irrésistiblement la croyance que la structure de l'énoncé reproduirait la structure du fait qu'il affirme.

Si certaines distinctions linguistiques sont superficielles et ne correspondent à aucune structuration de la réalité, certaines autres, par exemple entre parties du discours, ont une importance métaphysique : il y aurait ainsi fondamentalement des noms propres, des adjectifs, des verbes, des prépositions et des conjonctions ; et il serait naturel de supposer que dans un langage idéal, les noms propres indiquent les substances, les adjectifs les propriétés grâce auxquelles les substances sont rassemblées en classes, que les verbes et les prépositions indiquent les relations, et les conjonctions les connecteurs vérifonctionnels.

S'il y a réellement de telles catégories dans le monde, il est souhaitable que le langage les symbolise, et les erreurs métaphysiques viennent probablement du fait que le langage s'acquitte de cette tâche de manière imprécise. [...] Il y a un point sur lequel le langage a tendance à nous induire en erreur, c'est le fait que *les mots qui symbolisent les relations sont eux-mêmes aussi substantiels que les autres mots*⁵⁶.

Cette dernière remarque est essentielle pour comprendre la variante de réalisme structural que Russell défend et qui consiste à entériner le processus de désubstantialisation de la matière sans renoncer pour autant à construire une interprétation réaliste de la physique qui se passerait par conséquent de la notion de substance permanente. Si les percepts permettent d'inférer de la structure, les relations inférées doivent donc être considérées comme « substantielles » en quelque manière et la théorie russellienne des événements n'a pas d'autre office que de donner corps à cette intuition.

Le point de départ est ici ce que Russell nomme les « particuliers » qui sont les termes ultimes de la structure physique, du moins dans l'état présent des connaissances.

Un « particulier » sera quelque chose qui a à voir avec le monde physique du fait de ses qualités ou de ses relations à autre chose, et jamais du fait de sa propre structure, si jamais il devait par la suite en avoir⁵⁷.

Une onde transversale et une onde longitudinale diffèrent par exemple en structure ; l'atome qui est composé de protons et d'électrons, a de la structure et n'est donc pas un « particulier ». En un mot,

56. Russell 1927, p. 243. C'est nous qui soulignons.

57. *Ibid.*, p. 277.

quelque chose est un « particulier » si rien dans les lois connues qui concernent son comportement et les relations qui le lient aux autres termes ne permet d'inférer de la structure, quelle qu'elle soit. Du point de vue logique, les « particuliers » remplissent les conditions qui caractérisent ce qui a été défini comme « substance ». Mais ce qui a le caractère de la substance est désormais provisoire : des connaissances ultérieures pourront peut-être permettre d'attribuer de la structure à ce qui n'en a pas pour le moment. La notion même de « particulier » est relative à un certain corpus de connaissances, ce n'est pas une notion métaphysique. Les atomes étaient des particuliers, ils ne le sont plus. Ce surcroît de structure ne rend toutefois pas fausses les propositions antérieurement acquises – les propositions chimiques, par exemple, peuvent être énoncées sans tenir compte de la structure des atomes.

Comment caractériser les « particuliers » en lesquels se résoudrait notre connaissance du monde extérieur ? À l'instigation de Whitehead, Russell introduit la notion d'« événement » qui correspond à une sorte de spécification de la notion de « particulier » eu égard aux relations d'espace-temps.

De ce qui a été dit à propos de la substance, je tire la conclusion que la science a affaire à des groupes d'« événements », plutôt qu'à des « choses » qui auraient des « états changeants ». C'est aussi la conclusion naturelle qu'il faut tirer de la substitution de l'espace-temps à l'espace et au temps. La vieille notion de substance était en quelque manière appropriée tant que nous pouvions croire en un unique temps cosmique et un unique espace cosmique ; mais elle ne s'ajuste plus si facilement lorsque nous adoptons un cadre d'espace-temps quadridimensionnel. Je supposerai par conséquent que le monde physique doit être construit à partir des « événements », par quoi je veux dire... des entités ou des structures qui occupent une région d'espace-temps qui est petite relativement aux quatre dimensions. Les « événements » peuvent avoir de la structure, mais il est commode d'utiliser le mot « événement » au sens strict pour signifier quelque chose qui, s'il a de la structure, n'a toutefois pas de structure spatio-temporelle, c'est-à-dire n'a pas de parties qui soient externes les unes par rapport aux autres dans l'espace-temps⁵⁸.

Le but de Russell est alors de reconstruire la variété espace-temps de la relativité générale à partir de ces « événements », en retrouvant par les seules ressources de la logique mathématique

58. *Ibid.*, p. 286.

(1) la structure topologique (et éventuellement la structure différentiable) ; (2) la structure métrique ; et enfin (3) la structure causale de l'espace-temps⁵⁹.

Types de causalité et ontologie des occurrences physiques

Pour que la perception puisse être une source de connaissance, il est essentiel qu'il y ait dans le monde physique des chaînes causales indépendantes, sinon aucune information ne serait véhiculée concernant le monde extérieur. Tout l'effort d'analyse de Russell consiste à distinguer plus finement deux formes principales de causalité physique : d'un côté une causalité intrinsèque, pour ainsi dire, incorporée à la variété espace-temps de la relativité générale, et de l'autre une causalité extrinsèque prévalant dans les phénomènes quantiques.

On peut, selon Russell, distinguer en première approche plusieurs types de processus causaux à l'œuvre dans le monde physique :

- (1) les radiations indépendantes de la matière, c'est-à-dire la lumière comprise comme vibration transverse « dont on peut dire qu'elle se produit dans l'éther, si on trouve dans cette idée quelque réconfort »⁶⁰ mais dont la structure seule, débarrassée de tout élément pictorial, importe au physicien ;
- (2) le mouvement de la matière ;
- (3) la transmission de processus par la matière elle-même (son, courant électrique, etc.), dont l'analyse plus fine révèle une scission entre deux notions distinctes, celle de propagation d'une *perturbation dans la matière* d'une part, et celle d'*interaction entre particules de matière*, d'autre part ;
- (4) les changements quantiques enfin qui posent un problème spécifique et semblent exiger le maintien de lois causales extrinsèques.

Que la propagation de la lumière soit incorporée à la géométrie de l'espace-temps est un acquis depuis la théorie de la relativité res-

59. Cf. dans ce même volume, sur le détail de la construction russellienne : « La construction logique de la variété espace-temps. Ordre, métrique, causalité », p. 225-244.

60. Russell 1927, p. 316.

treinte. L'analyse de la notion de mouvement de la matière semble en revanche requérir l'introduction de concepts plus fins, pour autant que Russell distingue deux étapes dans la transformation du concept de matière : (1) d'abord le passage de la notion de particule matérielle localisée dans l'espace à différents instants du temps – la notion corrélative de trajectoire supposant la séparation entre espace et temps – à ce qu'il nomme les « lignes causales », c'est-à-dire les géodésiques de la relativité générale ; (2) ensuite le passage des « lignes causales » aux « lois causales ».

Concernant le premier point, l'avènement de la théorie de la relativité conduisait naturellement à une refonte de la géométrie et de la causalité dans un même cadre, celui de la variété espace-temps.

Puisque la formule pour le ds^2 est formellement la même pour les intervalles de genre temps et pour les intervalles de genre espace, il n'y a plus lieu de faire la différence entre relations causales et relations géométriques. Les géodésiques sont géométriques, mais elles sont aussi les chemins de particules matérielles. C'est à peine s'il est correct de dire qu'une particule se meut le long d'une géodésique ; il est plus correct de dire qu'une particule est une géodésique, quoique toutes les géodésiques ne soient pas des particules... Ainsi géométrie et causation sont-elles inextricablement mêlées⁶¹.

Russell lie même étroitement co-ponctualité et causalité et fournit de ce fait une justification philosophique au principe des lois causales différentielles⁶² en physique. La causalité n'agit pas réellement de proche en proche dans un espace-temps supposé primitivement continu, car si elle s'exprime synthétiquement dans les lois différentielles dans le cadre d'un tel espace-temps, elle opère en fait plus fondamentalement au niveau des événements.

[...] Un groupe d'événements co-ponctuels peut avoir des effets qui auraient été impossibles si les événements n'avaient pas été co-ponctuels. C'est la raison pour laquelle la physique est contrainte de recourir aux points pour énoncer ses lois causales. Jusqu'à ce que nous ayons un groupe complet d'événements co-ponctuels, c'est-à-dire un point, nous ne pouvons pas être absolument sûrs des effets qui s'ensuivront de chacun des événements⁶³.

61. *Ibid.*, p. 313.

62. *Ibid.*, chap. XI.

63. *Ibid.*, p. 315.

La causalité suppose ainsi en quelque sorte la totalisation des causes concurrentes à la production d'un effet, c'est-à-dire le concept de point compris comme ensemble maximal d'événements co-punctuels. Il faut donc à la fois des séries causales indépendantes les unes des autres et les interactions entre événements co-punctuels pour donner substance au monde physique.

Ce sont ces deux lois opposées, à savoir d'une part des lois causales approximativement séparées, et d'autre part des interactions entre événements co-punctuels, qui constituent la chaîne et la trame du monde [*make the warp and woof of the world*]⁶⁴.

Mais pour cette géométrie causale de l'espace-temps, la matière est toujours localisée en certains points, à savoir les centres autour desquels s'organisent les événements. Or cette notion même de localisation de la matière est problématique. Qu'est-ce alors au juste qu'une « ligne causale » ? Qu'est-ce qui constitue une portion de matière et qu'est-ce qui fait que nous puissions dire que nous avons affaire à la même portion de matière à deux instants différents ?

Telle sorte de connexion causale entre événements nous fait regarder ces événements comme des parties de l'histoire d'un même morceau de matière, et pas telle autre sorte, mais il n'y a pas de connexion plus étroite entre un électron à un instant et le même électron à un autre instant qu'entre deux parties d'un rayon lumineux⁶⁵.

Ne devrait-on pas plutôt abandonner le concept de lignes causales au profit d'un concept de lois causales, et transformer la matière en « une simple loi selon laquelle les événements se produisent dans des lieux où il n'y a pas de matière »⁶⁶ ? Selon la relativité générale, une particule de matière ne serait qu'une « ride [*crinkle*] qui s'amenuise à mesure qu'on s'en éloigne, mais qui s'étend à l'espace tout entier »⁶⁷. L'influence d'Eddington et de son principe d'identification conduit Russell à mettre en cause le concept même de lois causales extrinsèques qui jouait un rôle central dans l'image du monde de la physique traditionnelle : la matière agissant à distance sur la matière comme dans la gravitation newtonienne.

64. Russell 1927.

65. *Ibid.*, p. 317.

66. *Ibid.*, p. 324.

67. *Ibid.*, p. 327.

Toutefois les phénomènes quantiques ne s'intègrent pas facilement à une théorie des champs censée permettre la géométrisation des interactions en les incorporant aux variables sources des champs.

[...] il semble que nous soyons conduits à la conclusion que les seules lois causales qui relient véritablement une portion de matière à une autre soient les lois quantiques, dans lesquels il y a différents stades : premièrement un processus périodique n'ayant aucun effet extérieur ; deuxièmement la division soudaine de l'énergie de ce processus en deux parties, un nouveau processus périodique dans le corps d'origine d'un côté, et un autre processus périodique voyageant dans l'espace vide de l'autre ; troisièmement, l'arrivée du processus migrant dans un autre corps ; quatrièmement un changement quantique dans cet autre corps, impliquant l'absorption de l'énergie radiante dans la production d'un nouvel état stable dans le corps absorbant. Toutes les relations causales véritables entre corps différents, du moins pouvons-nous le supposer, impliquent ce processus de perte soudaine et d'acquisition d'énergie par deux corps différents. Les vieilles lois physiques telles qu'elles sont réinterprétées par la relativité, peuvent apparemment être énoncées de façon à laisser les corps indépendants les uns des autres ; mais je ne vois pas comment les lois quantiques pourraient l'être⁶⁸.

Dans le contexte de la gravitation relativiste par exemple, les corps sont indépendants les uns des autres parce que ce qui valait dans l'ancienne conception comme interaction est désormais pris en charge par la géométrie de l'espace-temps. Mais il n'en va pas de même pour le schéma conceptuel de la théorie quantique, où la causalité extrinsèque semble incontournable. La reconnaissance de ces deux causalités fournit alors la clef d'une ontologie différenciée des occurrences physiques.

La périodicité s'impose comme un trait essentiel de la réalité physique comme le montrent les phénomènes quantiques, depuis la quantification du moment cinétique où l'on intègre sur une période entière. Russell propose donc une analyse originale des processus périodiques, c'est-à-dire leur reconstruction à partir de séries d'événements vérifiant certaines propriétés adéquates. Le point de départ consiste à repenser de fond en comble la nature de la périodicité dans un cadre relativiste. Cherchons en effet à définir la périodicité en termes de mouvements : un processus est périodique

68. *Ibid.*, p. 331.

si un corps décrit indéfiniment la même trajectoire fermée dans l'espace, pensons par exemple au mouvement d'une planète autour du soleil. Mais il n'y a rien de tel dans l'espace-temps, puisqu'aucun point d'espace-temps ne peut être occupé deux fois de suite. Un mouvement périodique le long d'une ellipse dans l'espace par exemple correspondra à une géodésique unicursale qui ne se referme jamais sur elle-même. En outre la périodicité dans l'espace est toujours relative à un système de coordonnées, et le changement d'axes peut entraîner de telles distorsions que toute périodicité disparaîtrait. La solution de Russell consiste à faire de la périodicité une propriété fondamentale⁶⁹ constituée par la récurrence de « qualités » et ancrée directement dans la strate des événements. La réflexion prend appui sur une « hypothèse fantastique »⁷⁰ : supposons qu'un électron tourne autour d'un proton et imaginons qu'on puisse prendre des photographies du proton à partir de l'électron et inversement des photographies de l'électron à partir du proton. On obtiendrait une configuration symétrique, d'un côté un événement E associé à l'électron et une série d'événements p_i coprésents à E et deux à deux coprésents, chacun avec le suivant, correspondant aux aspects de P « vus » de E ; et de l'autre quelque chose d'analogue pour le proton. Russell extrait de cette situation idéalisée, la structure des séries d'événements qui constituent le processus discret⁷¹, puis l'étend aux processus continus⁷².

La catégorisation des occurrences physiques qui se dégage de cette analyse des formes de causalité permet alors de distinguer trois grands types : (1) les « événements stables », c'est-à-dire, comme nous allons le voir, les événements qui sont membres d'au moins deux points ayant entre eux un intervalle de genre temps ; (2) les « rythmes », c'est-à-dire les processus périodiques, discrets ou non, ou les cycles récurrents d'événements ; enfin (3) les « transactions », c'est-à-dire les phénomènes quantiques dans lesquels de l'énergie passe d'un processus à un autre. Notons que dans ce dernier cas, les processus en cause doivent être périodiques, faute de quoi le principe de la quantification de l'action perdrait sa raison d'être⁷³.

69. Russell distingue les processus périodiques qui ont lieu dans la matière des processus périodiques indépendants de la matière comme la propagation de la lumière, mais celle-ci n'est un processus périodique que du point de vue du corps qui l'émet ou du corps qui la reçoit. Il s'agit ici des premiers.

70. Russell 1927, p. 347.

71. *Ibid.*, p. 348.

72. *Ibid.*, p. 351.

73. *Ibid.*, p. 360.

Prenons un exemple simple, celui de l'émission de lumière par un atome d'hydrogène ; on passe d'un processus périodique, la révolution de l'électron sur une orbite donnée, à deux processus périodiques : la révolution de l'électron sur une orbite de niveau d'énergie moindre, et une onde lumineuse. L'énergie est conservée, la quantité d'action pendant une période du premier processus est un multiple de la constante de Planck h , et par conséquent les quantités d'action des processus résultants pendant leurs périodes respectives le sont aussi. La prise en compte de la causalité extrinsèque et la reconnaissance de la périodicité comme propriété fondamentale de la réalité physique contraignent donc ici l'ontologie.

Vers un espace-temps discret

La tâche du philosophe de la physique consiste selon Russell à élaborer certaines hypothèses que l'on pourrait dire spéculatives, qui fournissent un cadre théorique grâce auquel on puisse rétablir une certaine forme de continuité entre la perception et la théorie physique.

La seule attitude légitime face au monde physique semble être d'adopter une position de complet agnosticisme relativement à toutes ses propriétés qui ne sont pas mathématiques. Toutefois il y a quelque chose à faire pour construire des mondes physiques possibles qui satisfont aux équations de la physique et cependant ressemblent davantage au monde de la perception qu'au monde qu'on nous présente d'habitude en physique. De telles constructions ont le mérite de rendre plus fiable l'inférence de la perception à la physique... mais elles ne doivent pas être confondues avec la connaissance scientifique : ce sont des hypothèses qui peuvent par la suite se révéler fécondes, et qui ont déjà une certaine valeur imaginative. Mais il ne faut pas penser qu'elles soient rendues nécessaires par quelque principe d'inférence scientifique que ce soit⁷⁴.

L'hypothèse de l'espace-temps discret que Russell suggère à plusieurs reprises est sans doute le meilleur exemple de ce type d'hypothèses spéculatives. Peut-être faut-il discerner encore une fois ici l'influence d'Eddington qui conciliait un espace-temps réticulé et lacunaire à très petite échelle et l'espace-temps continu avec courbure de la relativité émergeant comme moyenne à grande échelle⁷⁵.

74. *Ibid.*, p. 271.

75. Eddington 1921, p. 115.

Mais les raisons qui conduisent Russell à formuler cette hypothèse lui sont spécifiques car elles prolongent celles qui l'avaient conduit à refuser les « tenseurs substantiels » d'Eddington.

Il est aisé d'introduire des axiomes de façon à rendre notre espace-temps continu et de s'assurer, comme dans la physique courante, que la discontinuité sera confinée aux phénomènes quantiques, c'est-à-dire à ce que nous avons appelé les « transactions ». Mais si nous faisons comme cela, notre définition de l'intervalle doit être abandonnée, et l'intervalle retrouve sa place [dans la théorie] comme quelque chose de mystérieux et dont on ne peut pas rendre compte. Il n'y a pas de raison logique à ce que cette notion n'ait pas une place de ce genre ; [...] *Mais c'est toujours intellectuellement satisfaisant lorsque nous pouvons réduire le nombre de choses inexplicables...* C'est pourquoi il vaut la peine de développer une hypothèse discontinuiste si nous pouvons par là accroître l'unité et réduire la part d'arbitraire dans notre conception du monde physique⁷⁶.

S'il faut reconnaître qu'il n'y a aucun argument empirique en faveur ou à l'encontre d'une conception qui stipulerait que les intervalles d'espace-temps sont discrets et mesurés par des nombres entiers, l'hypothèse d'espace-temps discret a néanmoins valeur heuristique parce qu'elle permettrait non seulement de rendre compte de la métrique mais aussi d'unifier dans un même cadre théorique phénomènes quantiques et phénomènes relativistes.

Ivahn SMADJA

Université Denis Diderot – Paris 7

76. Russell 1927, p. 375. C'est nous qui soulignons.

Références bibliographiques

- EDDINGTON A.S. (1920a), « The meaning of matter and the laws of nature according to the theory of relativity », *Mind*, 29, p. 145-158.
- EDDINGTON A.S. (1920b), *Space, Time and Gravitation*, Cambridge, Cambridge University Press.
- EDDINGTON A.S. (1921), *Espace, Temps et Gravitation*, M. Rossignol (trad.) avec adjonction d'appendices mathématiques par Eddington, Paris, Hermann.
- EDDINGTON A.S. (1923), *The Mathematical Theory of Relativity*, Cambridge, Cambridge University Press (rééd. 2007).
- EDDINGTON A.S. (1938), *The Philosophy of Physical Science*, Cambridge, Cambridge University Press.
- EINSTEIN A. [1921] (2005), *Quatre Conférences sur la Relativité*, M. Solovine (trad.), Paris, Dunot.
- JAMMER M. (2008), *Concepts d'espace. Une histoire des théories de l'espace en physique*, traduction, introduction et notes par L. Mayet et I. Smadja, Paris, Vrin.
- MERLEAU-PONTY J. (1965), *Philosophie et théorie physique chez Eddington*, Paris, Les Belles Lettres.
- RUSSELL B. [1918] (1991), *Introduction à la philosophie mathématique*, F. Rivenc (trad.), Paris, Payot.
- RUSSELL B. (1927), *The Analysis of Matter*, New York, Harcourt, Brace & Co. (rééd. Londres – New York, Routledge, 1992).
- RUSSELL B. (1961), *Histoire de mes idées philosophiques*, G. Auclair (trad.), Paris, Gallimard.
- RYCKMAN Th. (2005), *The Reign of Relativity. Philosophy in Physics 1915-1925*, Oxford, Oxford University Press.
- SCHOLZ E. (2005), « Practice-related symbolic realism in H. Weyl's mature view of mathematical knowledge », in *The Architecture of Mathematics*, Ferreiros, J. & Gray, p. 291-310.
- WEYL H. (1922), *Temps, espace, matière. Leçons sur la théorie de la relativité générale* (traduction française à partir de la quatrième édition allemande par G. Juvet et R. Leroy), Paris, Blanchard.
- WHITEHEAD A.N. (1922), *The Principle of Relativity with Applications to Physical Science*, Cambridge, Cambridge University Press.
- ZAHAR E. (1980), « Einstein, Meyerson and The Role of Mathematics in Physical Discovery », *BjPS*, 31, p. 1-43.