

# EN QUEL SENS L'ESPACE-TEMPS EST-IL UNE SUBSTANCE ?

ÉLIE DURING

Les réflexions qui suivent trouvent leur origine dans un paradoxe : la relativisation de l'espace et du temps dans le cadre de la relativité restreinte et même générale, loin de conforter un quelconque « relativisme » philosophique, se traduit par l'instauration d'un *nouvel absolu*. La combinaison des mesures d'espace et de temps dans un ordre spatio-temporel unifié est désormais référée à un *espace-temps* à quatre dimensions, doté d'une structure géométrique particulière, à la fois plus intimement lié aux déterminations physiques du mouvement que l'espace et le temps absolus de Newton, et moins susceptible que l'éther d'être simplement confondu avec un milieu de propagation ou un fluide subtil. L'espace-temps n'est pas une chose, si par là on entend une entité matérielle dotée de propriétés mécaniques ; s'il a quelque chose de substantiel, il ne se confond pas lui-même avec une substance au sens ordinaire. En quel sens, dès lors, peut-il être pensé sous la catégorie de substance ?

Simplicité, unité, permanence : on pourrait examiner un à un les traits traditionnellement associés à cette notion, et montrer dans quelle mesure ils s'appliquent à l'espace-temps. Mais en procédant de la sorte, n'accorderait-t-on pas d'emblée ce qui est en question, à savoir justement le fait que nous avons

affaire avec l'espace-temps à un individu, à un existant réel, distinct des substances matérielles tout comme des relations spatio-temporelles qui les connectent les unes aux autres ? Il paraît plus judicieux, pour éviter cette pétition de principe, de partir de la notion d'absolu couramment attachée à celle d'espace, en gardant à l'esprit le fait que Newton, qui n'hésitait pas pour sa part à parler d'« espace absolu », se montrait en revanche extrêmement prudent lorsqu'il s'agissait de lui accorder un statut métaphysique. De l'espace-temps, dira-t-on, avec la même prudence, qu'il n'est proprement ni substance ni accident, comme on peut le lire dans le *De Gravitatione* ? Ou bien, à la faveur d'un détour cosmologique, y cherchera-t-on un sens renouvelé de la substance ?

Les disputes qui opposent aujourd'hui les partisans du substantialisme et du relationnisme, lointains héritiers de Clarke et de Leibniz, mobilisent systématiquement la notion de substance dans le cadre de stratégies de réduction (des relations aux termes qui les portent, ou des termes aux relations qui les identifient) ; on ne s'y préoccupe généralement pas beaucoup de la forme espace-temps elle-même, et de la manière dont elle permet de donner une figure à l'univers pris en totalité. C'est pourtant sur ce point que la relativité apporte une contribution décisive, en liant indissolublement la question de la permanence à celle de la coexistence, en un sens que Kant ne pouvait concevoir lorsqu'il effectuait le montage de ses trois « analogies de l'expérience ».

#### DEUX VERSIONS DE L'ABSOLU : INVARIANCE ET INDÉPENDANCE

Commençons par cette question : En quel sens l'espace-temps peut-il être dit « absolu » ? Il faut ici distinguer deux manières de comprendre ce terme.

« Absolu » s'oppose en premier lieu à « relatif » : il désigne l'invariant sous la variété des apparences. Sur la base de quelques principes formels (invariance des lois par changement de référentiel, principe de localité ou de propagation des influ-

ences causales à vitesse finie), principes dont on pourrait dire qu'ils définissent désormais l'*a priori* constitutif de toute objectivité physique, l'espace-temps se présente avant tout comme une condition formelle de la saisie rationnelle des interactions entre systèmes matériels. Plus précisément, — et sans avoir à invoquer les métaphores fâcheusement chosistes du « contenant » universel, — l'espace-temps est un cadre qui semble totaliser, en tout cas organiser, les perspectives cinétiques que nous attachons aux systèmes en mouvement (« référentiels »). De la reconnaissance de la nécessité rationnelle de ce cadre à sa position comme une réalité *sui generis*, il y a un pas que Hermann Minkowski, à qui l'on doit l'invention du formulaire géométrique de l'espace-temps (en 1908, il y a exactement un siècle), n'a pas hésité à franchir. Son article fondateur l'exprime d'ailleurs avec un certain lyrisme : « Dès maintenant, l'espace indépendant du temps, le temps indépendant de l'espace, ne sont plus que des ombres vaines ; une sorte d'union des deux doit seule subsister <sup>1</sup>. » Union, fusion, amalgame : dans la prose de Minkowski, l'espace-temps apparaît d'emblée comme une nouvelle substance, le suppôt auquel toutes les apparences relatives et arbitraires doivent pouvoir ultimement être rapportées. Tout se passe comme si l'unification de l'espace et du temps sous la forme d'un espace à quatre dimensions, doté de sa structure de groupe, avec ses invariants, suffisait à conférer à l'espace-temps pris dans son ensemble le caractère d'une substance capable d'exister par elle-même.

Les phénomènes ne nous révèlent qu'un univers à quatre dimensions d'espace et de temps, tandis que leur projection dans le temps ou dans l'espace peut être représentée encore avec une certaine liberté ; pour cette raison, je donnerai plutôt à cette affirmation le nom de *Postulat de l'Univers absolu*, ou plus brièvement, *Postulat de l'Univers (Weltpostulat)* <sup>2</sup>.

1. Hermann Minkowski, « Raum und Zeit », *Physikalische Zeitschrift*, 1909, trad., « Espace et temps », *Annales scientifiques de l'ENS*, 26, 1909, p. 500.

2. *Ibid.*, p. 507-508.

Tous les développements consacrés, dans la littérature contemporaine sur l'espace-temps, au statut du devenir dans l'« univers-bloc » à quatre dimensions (*block universe*) sont tributaires de cette manière de présenter les choses.

En un second sens du terme « absolu », l'espace-temps apparaît irréductible aux relations spatio-temporelles entre les corps ; en allant un peu plus loin, on serait même tenté de dire que celles-ci le présupposent ou s'en déduisent comme des propriétés internes. « Absolu » s'entend à présent par différence avec « relationnel » : il est synonyme d'indépendance. En tant qu'absolu, l'espace-temps a un mode d'existence propre ; il peut se penser jusqu'à un certain point indépendamment des relations spatio-temporelles qu'il organise. C'est en ce sens qu'il faut prendre le mot « *substantivalism* » dans le débat vif qui oppose aujourd'hui, dans les revues anglo-saxonnes, les partisans du relationnisme et les partisans du substantialisme (pour éviter d'avoir à parler de « substantivalisme <sup>1</sup> »). Ce débat rejoue avec de nouveaux outils la querelle qui opposa jadis Leibniz à Clarke, à travers un échange de lettres non moins vif, au sujet du statut métaphysique de l'espace et du temps. Derrière le relationnisme, il y a généralement une thèse de relativisation d'un ordre de réalité à un autre. Par exemple, des relations elles-mêmes aux *relata*, ou des déterminations spatio-temporelles aux corps qui en sont les véritables suppôts. La relativisation prend alors la forme d'une réduction. On dira par exemple qu'espace et temps ne sont rien de substantiel au-delà des relations que les véritables substances, justement, entretiennent entre elles (ordre de succession, ordre de coexistence, pour reprendre le vocable de Leibniz).

Si les coordonnées du problème ont changé avec le passage de la physique newtonienne à la physique relativiste et l'introduction explicite d'un espace-temps quadridimensionnel, certains arguments semblent pouvoir être transportés tels quels d'un contexte à l'autre. Avant de les réactiver, cependant, il

1. Cf. Carl Hoefer, « Absolute versus Relational Spacetime : For Better or Worse, the Debate Goes on », *The British Journal for the Philosophy of Science*, 49 (3), 1998.

faut reconnaître les raisons qui aujourd'hui semblent donner d'emblée un avantage à la position substantialiste, en dépit de ce que semble suggérer le mot même de « relativité ». Le mode de liaison — la « tenue », si l'on veut — de l'espace-temps relativiste témoigne en effet d'une qualité nouvelle : son mode de construction lui confère une unité plus « substantielle » et en un sens moins artificielle que celle de l'espace-temps qu'une lecture rétrospective nous permet d'identifier dans la mécanique classique, là même où espace et temps étaient introduits comme essentiellement séparés. Rappelons en effet que l'idée de considérer le temps comme une quatrième dimension de l'espace n'est nullement une invention d'Einstein : on la trouve déjà très explicitement chez d'Alembert et Lagrange, ou encore chez Kant, dans une longue note du § 14 de la *Dissertation* de 1770 consacrée à la simultanéité comme manifestation de l'« ubiquité » du temps. Mais justement, l'espace-temps n'apparaît comme objet *sui generis*, doté d'une unité et d'une substantialité encore plus fortes que celles de l'espace et du temps séparés, qu'à partir du moment où les déterminations d'espace et de temps se trouvent indexées aux référentiels et à leurs vitesses relatives. Il fallait avoir relativisé — et donc en ce sens désubstantialisé — espace et temps pris à part pour parvenir à intriquer les déterminations spatiales et temporelles dans une unité plus solide et plus profonde, porteuse d'un nouvel absolu. Tel est le paradoxe de l'espace-temps dont nous sommes partis. Si l'espace-temps, sans être lui-même un existant physique, doit être néanmoins pensé sous la catégorie de substance — en un sens qui reste à préciser —, c'est qu'il est quelque chose de plus que l'addition (le produit cartésien, pour être précis) de ses parties (espace et temps). Est-on fondé à en déduire qu'il ne se réduit pas à l'ordre qu'il exhibe ? Qu'il est autre chose qu'une simple représentation géométrique, c'est-à-dire autre chose qu'une abstraction ? Telle est la question qu'on se propose d'examiner maintenant.

Quelques remarques permettront de clarifier d'emblée les choses.

En premier lieu, si l'on considère l'espace-temps comme absolu, distinct des perspectives relatives attachées aux diffé-

rents référentiels, il faut reconnaître que la « théorie de la relativité » est bien mal nommée. On sait qu'Einstein lui-même préférait parler de « théorie des invariants » (*Invariantentheorie*), une expression suggérée en 1910 par Felix Klein, l'auteur du programme d'Erlangen, auquel on doit d'avoir introduit l'interprétation des géométries en termes de groupes de transformation. Dans un article de 1948, Arnold Sommerfeld, dont il est utile de se souvenir qu'il fut lui-même l'élève de Felix Klein, exprime ainsi sa préférence pour la désignation en termes d'invariants : « La théorie de la relativité est en conséquence une *Invariantentheorie* du groupe de Lorentz. Le nom de théorie de la relativité est un choix malheureux : ce n'est pas la relativité de l'espace et du temps qui est le point essentiel, mais l'indépendance des lois de la nature par rapport au point de vue de l'observateur<sup>1</sup>. » L'espace-temps, ressaisi dans sa structure profonde, à partir des invariants qui le caractérisent justement en tant qu'espace, serait donc le « lieu » où se manifeste l'objectivité des lois de la nature.

Il est certes aventureux de projeter en retour sur l'espace-temps lui-même cette objectivité qui ne vaut strictement que pour l'ordre d'enchaînement particulier des phénomènes de la nature. Qu'il existe quelque chose comme une structure spatio-temporelle objective du réel physique, comme on le reconnaît volontiers, cela ne règle certes pas la question de la portée ontologique réelle qu'on est prêt à accorder à l'espace-temps. Mais il n'est pas douteux que le fait qu'il se laisse identifier à partir de traits invariants ou absolus nous renseigne sur son mode d'existence. Si en effet l'espace-temps n'était *rien d'autre* qu'une structure géométrique capable d'unifier dans une représentation cohérente la multiplicité des perspectives prises sur les phénomènes, s'il n'était en somme qu'un espace abstrait, comparable aux espaces de phases ou aux espaces de configuration dont le physicien fait couramment usage, comprendrait-on qu'il puisse contraindre de façon aussi précise et rigoureuse les possibilités de mouvement des corps matériels ? À défaut

1. Cité par Arthur I. Miller, *Albert Einstein's Special Theory of Relativity*, Londres, Addison Wesley, 1981, p. 181.

d'être empiriquement observable indépendamment des phénomènes physiques eux-mêmes — ce qu'a bien montré Poincaré —, l'espace-temps possède une nature déterminée. Contrairement à l'espace qui, considéré en lui-même dans sa plus grande généralité, peut toujours être conçu comme « amorphe », pour reprendre l'expression de Poincaré, l'espace-temps tient sa forme et sa nature de ce qu'espace et temps s'y articulent sous un rapport qui n'a rien de trivial. De cette nature, on peut tirer une explication suffisante de certaines limitations universelles pesant sur le domaine des interactions physiques : ainsi, par exemple, le fait qu'une influence ne puisse se propager à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans le vide apparaît, non plus comme l'expression d'un fait brut et arbitraire de la nature (à quoi risque toujours de se réduire la constante  $c$ ), mais comme une propriété structurelle de l'espace-temps. L'ordre causal se lit dans sa structure topologique.

De manière générale, si en dehors de la matière il n'y avait que le vide, c'est la possibilité même d'une connexion spatio-temporelle entre les choses qui deviendrait problématique. Pour mesurer des distances astronomiques, on a généralement recours à la lumière : mesurer une distance revient, en pratique, à mesurer le temps que met un rayon de lumière à la parcourir. Pour qu'une telle procédure soit possible et effective, ne faut-il pas admettre, tout au long du trajet, quelque chose comme un milieu de connexion ? En suivant cette ligne de raisonnement, on est conduit à la conclusion suivante : non seulement l'espace-temps permet d'expliquer les *contraintes* qui pèsent sur les corps étendus et leurs possibilités de mouvement, mais à un niveau plus fondamental, il se confond avec le principe même de la *connexion* spatio-temporelle des corps matériels<sup>1</sup>.

1. Cf. Barry Dainton, *Time and Space*, Montreal, McGill-Queen's University Press, 2001, p. 137-138 ; Graham Nehrlich, *What Spacetime Explains*, Cambridge University Press, 1994. Ce dernier suggère que l'espace-temps, contrairement à l'espace euclidien, infini et homogène, remplirait une fonction dynamique en définissant une connexion affine capable, non seulement de situer les corps d'un instant à l'autre, mais encore de les « guider » pour ainsi dire le long des chemins géodésiques : « [S]ans la structure affine [de l'espace-temps] il n'y a rien qui peut déterminer la trajectoire d'une particule

Le relationniste, bien entendu, ne veut rien entendre de tout cela : il objecte que si l'on envisage directement les relations dynamiques entre les corps, il n'y a nul besoin d'introduire un intermédiaire réel qui serait l'espace-temps, intermédiaire entre les objets. Les relations spatio-temporelles y suffisent. Sur ce point les arguments de Leibniz semblent n'avoir rien perdu de leur actualité : ils reviennent à dire qu'il n'y a pas à proprement parler de relations objet-espace (ou objet-espace-temps), mais seulement des relations objet-objet, que la représentation sous forme d'espace-temps permet de décrire du point de vue de leurs propriétés géométriques globales. Mais le substantialiste n'est pas désarmé : il a beau jeu de répondre que la manœuvre relationniste, loin d'être une simple application du principe d'Occam, a un coût ontologique non négligeable. Elle oblige en effet à reconnaître, en plus des objets eux-mêmes, un ordre des connexions spatio-temporelles — autrement dit, un domaine de relations qui ne peuvent pas être aisément pensées comme des relations internes, et auxquelles il faut par conséquent reconnaître un statut spécial. Si l'on admet par ailleurs que de telles relations sont efficaces, qu'elles astreignent par exemple effectivement les corps à certains types de trajectoires, quoiqu'elles n'opèrent pas localement à la manière de forces d'attraction ou de répulsion physiques, il est légitime de se demander si la position défendue par le relationniste se distingue réellement de celle de ses adversaires.

Les remarques qui précèdent reviennent finalement à se demander si l'espace-temps jouit d'un mode d'existence absolu,

[libre]. Cette dernière n'a pas d'antennes qui pourraient lui indiquer où se trouvent les autres objets, dans le cas où il y en aurait... [...] C'est parce que l'espace-temps a la forme qu'il a que les lignes d'univers ont l'allure qu'elles ont » (Graham Nerlich, *The Shape of Space*, Cambridge University Press, 1976, p. 264). Ainsi l'idée de mouvement inertiel ou plus généralement de mouvement « libre » trouve son fondement dans le caractère substantiel de l'espace-temps. Einstein n'est parfois pas loin de partager ce point de vue. Mais on peut aussi considérer, avec Harvey Brown, que « si les particules libres n'ont pas d'antennes, elles n'ont pas davantage de capteurs d'espace-temps [*space-time feelers*] » (Harvey R. Brown, *Physical Relativity : Space-Time Structure from a Dynamical Perspective*, Oxford, Clarendon Press, 2005, p. 24).

cette fois-ci par différence avec relationnel — autrement dit un mode d'existence indépendant ou tout au moins irréductible aux relations spatio-temporelles entre les corps physiques. Or, cela semble vrai de la relativité restreinte, mais beaucoup moins de la relativité générale. Dans le cas de la restreinte, en effet, la géométrie de l'espace-temps (ou géométrie de Minkowski) est celle d'un espace pseudo-euclidien à quatre dimensions, tandis que l'espace-temps de la relativité générale se présente comme un espace variablement « courbé ». Cette courbure, chargée de rendre compte des effets de la gravitation, est en même temps fonction de la distribution de la matière-énergie au sein de l'univers. D'un côté, un cadre formel, d'ailleurs homogène, taillé sur mesure pour une mécanique des grandes vitesses, et des systèmes idéalement soustraits à l'influence de la gravitation ; de l'autre, une construction souple et différenciée, ajustée au mouvement concret d'expansion d'une matière universelle traversée par la force de gravitation. Cependant, même dans ce dernier cas, que les déterminations géométriques de l'espace-temps soient intrinsèquement liées à celles de la matière ou du champ n'empêche pas que l'espace et le temps, en tant que dimensions nouées dans la forme espace-temps, constituent en quelque sorte l'horizon premier à partir duquel de telles déterminations peuvent prendre sens. D'un point de vue métaphysique, la forme espace-temps fonctionne comme une présupposition absolue : elle fournit un cadre, une toile de fond pour la description du réel physique. Une fois abandonnée l'idée de déterminer *a priori*, — fût-ce sur la base de principes physiques, comme c'est le cas dans la relativité restreinte, — la forme universelle de la connexion entre les phénomènes, les figures particulières de l'espace-temps physique peuvent donc encore apparaître comme des substrats ou des suppôts. Plusieurs types d'arguments permettent d'étayer une telle affirmation. On dira par exemple que les figures de l'espace-temps liées à tel ou tel modèle cosmologique ne se laissent pas intégralement résorber dans le réseau des relations qu'entretiennent les corps les uns avec les autres, puisqu'aussi bien la forme espace-temps intervient à chaque fois dans la détermination mathématique de ces relations. La théorie de la

relativité générale montre, à travers les équations de champ, de quelle manière la métrique de l'espace-temps est liée à la distribution des objets dans l'univers ; mais cela même ne semble intelligible que si l'espace-temps a une existence distincte de celle du champ lui-même, ou des relations entre les objets. Cette conclusion est d'ailleurs renforcée si l'on parcourt la relation de dépendance dans l'autre sens. On dira alors qu'en relativité générale la forme même de l'espace-temps influence directement le mouvement des objets, par exemple l'accélération à laquelle ils sont soumis dans un champ de gravitation : c'est parce que l'univers quadridimensionnel présente une courbure que les corps accélèrent localement sur leur trajectoire en présence d'une masse voisine. Cette manière de s'exprimer est peut-être impropre ; elle tend à suggérer que l'espace-temps n'est pas une scène fixée *a priori*, un cadre rigide et uniforme. Mais en devenant pour ainsi dire partie prenante des interactions matérielles, celui-ci n'en demeure pas moins un cadre, et même un cadre particulièrement actif. Ce caractère actif de l'espace-temps confirme son caractère substantiel, bien qu'il faille se garder de penser son action sur le modèle d'une « force » s'exerçant de l'extérieur sur les corps en mouvement. Le concept d'éther qui resurgit dans le sillage de la relativité générale en donne une illustration frappante.

Cependant, quelle que soit la manière dont on envisage la relation de dépendance entre espace-temps et champ matériel, on se heurte tôt ou tard à la difficulté suivante. La géométrisation de la matière est corrélative d'une « matérialisation » de la métrique à travers le jeu d'échanges fixé algébriquement par les équations de champ. Si bien qu'à considérer l'espace-temps dans toute la richesse de ses déterminations métriques, on est insensiblement conduit à brouiller la frontière qui sépare la matière de l'espace-temps lui-même, et du même coup le substantialisme du relationnisme.

#### ÉTHER ET SUBSTANCE

Lorsqu'Einstein montre qu'aucune région de l'espace-temps ne peut être considérée comme rigoureusement vide, les

processus matériels associés au champ gravitationnel semblant devoir s'étendre aussi loin que le champ lui-même, il exprime d'une autre manière le fait que l'espace-temps n'est pas un cadre vide. À vrai dire, l'espace-temps n'est même plus ce qui vient « cadrer » le champ selon un rapport extérieur, mais seulement un aspect ou une propriété structurelle du champ lui-même. *A contrario*, lorsqu'est envisagée l'idée-limite d'un espace vide et néanmoins doté de qualités physiques et plus exactement métriques, — celles que définissent mathématiquement les composantes du potentiel de gravitation, — c'est pour mieux faire comprendre le sens nouveau que prend l'éther en relativité générale. Il ne s'agit plus alors d'un substrat, d'un milieu de propagation universel et immobile, répandu dans toute la matière : c'est un « éther dont l'état varie sans cesse d'un point à l'autre »<sup>1</sup>, et qui, tout en étant lui-même dépourvu de propriétés mécaniques ou cinétiques, « n'en contribue pas moins à la détermination des phénomènes mécaniques (et électromagnétiques) »<sup>2</sup>. L'espace vide apparaît alors comme un cas limite ou dégénéré de l'éther de la relativité générale, lorsque la densité de matière devient nulle. Mais où chercher l'espace-temps, dans son sens proprement physique, sinon dans cette nouvelle figure de l'éther qu'il n'est plus possible de se représenter par figures et mouvements, comme un milieu substantiel constitué de particules matérielles animées de vitesses bien définies, qui n'a donc plus rien d'un *medium* universel, qui semble enfin tout le contraire d'un cadre neutre ou d'une scène absolue ? Et que reste-t-il alors, justement, du caractère absolu ou substantiel qui nous paraissait inséparable de la caractérisation dynamique de l'espace-temps ?

Si l'éther relativiste s'identifie finalement au concept de champ, le sens dans lequel on peut lui appliquer la catégorie de « substance » s'en trouve radicalement modifié. Le champ n'a en effet nul besoin d'un support, car ses états ne sont pas des

1. « Dialogue sur les objections opposées à la théorie de la relativité » (1918), in Albert Einstein, *Œuvres choisies*, Fr. Balibard (éd.), vol. 5, Paris, Le Seuil, 1989, p. 70.

2. « L'éther et la théorie de la relativité » (1920), *ibid.*, p. 86.

accidents d'une substance matérielle : il constitue pour ainsi dire sa propre extension à travers son action même ; il est son propre milieu. Comme l'écrivait Einstein dans un article de 1907 :

Seule la représentation d'un éther lumineux porteur de forces [c'est-à-dire de champs] électriques et magnétiques ne cadre pas avec la théorie présentée ici ; les champs électromagnétiques apparaissent en effet ici non pas comme des choses douées d'une existence autonome, analogues à la matière pondérable, et qui ont en commun avec elle la caractéristique de l'inertie <sup>1</sup>.

L'éther relativiste d'Einstein se distingue donc de l'éther pourtant déjà nettement relativisé — au point de s'en trouver en quelque sorte sublimé <sup>2</sup> — de l'électromagnétisme classique, par le fait que, loin d'être un milieu ou un suppôt, il s'identifie avec la face extensive ou la spatialité *sui generis* du champ lui-même. Dès lors, la fonction du continuum quadridimensionnel « espace-temps » semble devoir se limiter à en produire la structure géométrique. À moins que, comme substrat des propriétés géométriques du champ, il ne soit rien d'autre que « la version vingtième siècle de l'hypothèse de l'éther » <sup>3</sup>.

Ces remarques convergent finalement vers un constat nettement favorable au relationnisme : à mesure que la relativité générale accorde un rôle plus dynamique, quasi-causal, à la

1. « Du principe de relativité et des conséquences tirées de celui-ci » (1907), in Albert Einstein, *Œuvres choisies*, éd. cit., vol. 2 (1989), p. 86.

2. Albert Einstein, « On the Aether » (1924), in Simon Saunders et Harvey R. Brown (dir.), *The Philosophy of Vacuum*, Oxford, Clarendon Press, 1991, p. 16. Cf. le texte de 1910 : « Mais lorsqu'on se fut peu à peu persuadé qu'aucune théorie mécanique de l'éther ne donnait d'une façon particulièrement saisissante une image des phénomènes électromagnétiques, on s'habitua à considérer les champs comme des entités dont l'interprétation mécanique était superflue. On en vint à regarder ces champs dans le vide comme des états particuliers de l'éther, n'exigeant pas une analyse plus approfondie » (Albert Einstein, « Le principe de relativité et ses conséquences pour la physique moderne », *Archives des sciences physiques et naturelles*, 29, 1910, p. 6).

3. Harvey R. Brown, *Physical Relativity: Space-Time Structure from a Dynamical Perspective*, Oxford, Clarendon Press, 2005, p. 67.

forme espace-temps, le champ à travers lequel s'exprime l'interaction des objets matériels tend à se confondre avec lui ; en conséquence, il voit sa dignité ontologique réduite à la portion congrue. Ou ce qui revient au même, il apparaît de plus en plus clairement comme une expression géométrique de la spatialité du champ. À la limite, il n'est que cela : une forme de représentation géométrique dont toute la teneur physique revient au champ, son véritable contenu.

Les choses ne sont pourtant pas si simples, et le statut qu'il convient d'accorder à l'espace-temps ou à l'éther quadridimensionnel est toujours un sujet de débat pour les physiciens. John Archibald Wheeler écrit ainsi : « Il est difficile d'imaginer question plus cruciale pour la physique que celle de savoir si l'espace-temps n'est qu'une simple scène ou s'il est le tout [du monde] »<sup>1</sup>. Faut-il reconnaître aux points du continu quadridimensionnel un caractère substantiel, au-delà de la forme mathématique que figurent leurs relations ? C'est un thème qui court de Lorentz et Poincaré aux théories les plus récentes du champ gravitationnel. En 1920 déjà, Eddington écrivait en conclusion d'un développement sur la géométrie de l'espace-temps :

Ce que nous avons appelé ici *le monde* aurait peut-être pu recevoir légitimement le nom d'*éther* ; à tout le moins, c'est bien un substrat universel (*universal substratum*) que nous donne la théorie de la relativité en lieu et place de l'éther<sup>2</sup>.

Cette formulation délicieusement ambivalente doit être rapprochée de cette autre, plus récente, qu'on trouve sous la plume de John Earman :

Lorsque la théorie de la relativité a banni l'éther, la variété spatio-temporelle *M* a commencé à fonctionner comme une espèce d'éther dématérialisé. Au dix-neuvième siècle, le champ électromagnétique a été conçu comme la propriété d'un milieu matériel,

1. John Archibald Wheeler, « Curved Empty Space-Time as the Building Material of the Physical World », in E. Nagel et P. Suppes (dir.), *Logic, Methodology and Philosophy of Science*, Stanford University Press, 1962, p. 361.

2. Arthur Stanley Eddington, *Space, Time and Gravitation*, Cambridge University Press, 1920, p. 187.

l'éther luminifère ; du point de vue des théories postrelativistes, il semble que le champ électromagnétique, et à vrai dire tous les champs physiques, doivent être conçus comme des états de  $M$ . Dans la version moderne pure de la physique des champs (*modern, pure field-theoretic physics*),  $M$  fonctionne comme la substance primitive (*basic substance*), c'est-à-dire le sujet de prédication fondamental<sup>1</sup>.

Toute la question est justement de savoir de quelle manière s'organise cette prédication. Si l'éther prérelativiste était conçu dans l'électromagnétisme classique comme le sujet d'inhérence des propriétés du champ, il participait en même temps, et peut-être plus fondamentalement, à un régime d'identification déictique ou indexical à chaque fois qu'un système de référence se trouvait conventionnellement désigné comme immobile par rapport à lui, et qu'on lui octroyait le privilège d'organiser l'ensemble de la scène, exactement comme s'il était encore possible de l'adosser à un espace absolu. L'espace-temps de Minkowski, tel qu'il est décrit dans la fameuse conférence de Cologne déjà citée, en conserve-t-il quelque chose ? Ce qui est certain, c'est que le thème classique de la substance comme suppôt jouissant d'une existence indépendante ou absolue, s'y exprime on ne peut plus clairement :

Cependant, je respecte encore le dogme selon lequel espace et temps ont une signification. J'appellerai *point de l'univers* (*Welt-punkt*) un point de l'espace uni à un point du temps, c'est-à-dire un système de valeurs  $x, y, z, t$ . J'appellerai *univers* (*Welt*) l'ensemble de toutes les valeurs imaginables  $x, y, z, t$ . [...] Pour ne laisser de vide béant nulle part, nous imaginerons qu'en chaque lieu et à chaque instant il existe quelque chose de perceptible. Afin d'éviter de parler de « matière » ou d'« électricité », je désignerai ce quelque chose par le terme « substance » (*Substanz*). Nous porterons notre attention sur le point substantiel (*substantiellen Punkt*) situé au point de l'univers  $x, y, z, t$  et nous

1. John Earman, *World Enough and Space-Time : Absolute versus Relational Theories of Space and Time*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1989, p. 155.

supposerons que nous sommes en état de le réidentifier à tout autre moment <sup>1</sup>.

Cette idée apparaît problématique lorsqu'on l'examine aujourd'hui dans le sillage de la relativité générale. La géométrie différentielle conduit à distinguer entre le champ métrique associé à la variété différentiable et sa structure topologique. Une première version du substantialisme consiste alors à accorder un caractère substantiel aux points qui constituent cette variété, le continuum à quatre dimensions : les points de l'espace-temps, qui peuvent ou non coïncider avec des événements actuels, auraient une existence par eux-mêmes, indépendamment des propriétés métriques de l'espace-temps. Même si l'on accorde au relationniste l'idée selon laquelle les propriétés associées aux points ne sont pas intrinsèques mais relationnelles, de sorte que l'identité de chaque point est constituée par sa relation à tous les autres, il reste qu'il faut bien leur reconnaître une forme d'existence substantielle pour que les pro-

1. Hermann Minkowski, « Espace et temps », art. cit., p. 501-502 (traduction modifiée). Les points substantiels sont parfois désignés comme des « événements » de l'espace-temps. Un physicien contemporain, Robert Geroch, le fait remarquer dans son cours d'introduction à la relativité : les événements associés aux points substantiels de l'espace-temps ne doivent pas être confondus avec des occurrences matérielles, ils sont plutôt des « occurrences idéalisées » qu'il faut se représenter, à la limite, comme sans extension dans l'espace ni dans le temps (Robert Geroch, *General Relativity from A to B*, Chicago University Press, 1978, p. 3). C'est dire que le phénomène physique qui coïncide localement avec l'événement entendu en ce sens, n'est qu'une marque extérieure qu'il faut se garder de confondre avec l'événement lui-même. Un processus physique, aussi ténu qu'on se le figure, est nécessairement étendu dans l'espace et dans le temps. Mais on n'hésitera pas à déclarer que deux événements sont « les mêmes » dès lors qu'ils coïncident spatio-temporellement, c'est-à-dire qu'ils « ont lieu en un même point, en un même temps » : « [A]lors nous ne nous occupons plus de la manière dont l'événement est marqué — par [l'explosion d']un pétard ou un claquement des doigts — mais uniquement de la chose elle-même » (*ibid.*, p. 4). Cependant, Geroch se garde bien de se prononcer, métaphysiquement, sur la réalité des événements considérés en eux-mêmes : ce qui compte est de définir, géométriquement, les *relations* entre les événements (*ibid.*, p. 4-5).

priétés des champs de matière-énergie puissent être instanciées sur eux. Les controverses au sujet de l'argument dit du « trou » (le « *hole argument* », auquel Einstein s'est trouvé confronté dès 1913<sup>1</sup>) tiennent à ce que l'espace-temps, considéré en lui-même, présente des symétries (des invariances sous certaines transformations) qui ont pour effet de rendre possibles des états physiques théoriquement distincts, et cependant indiscernables. Autrement dit, les modèles physiques de l'espace-temps ne sont pas déterminés de manière univoque ; il y a plusieurs manières équivalentes de « plonger » un champ de matière-énergie dans l'espace-temps. Faut-il continuer à postuler, derrière de telles situations indiscernables, des points-substances jouissant d'une existence indépendante ? Les points de l'espace-temps ne sont-ils pas plus correctement décrits comme de simples sujets d'attribution idéaux, en réalité inséparables de la matière et du champ métrique qu'elle détermine ?

Mais à nouveau, si la matière n'est elle-même pas pensable indépendamment de l'étendue spatio-temporelle, si le champ se donne seulement comme la face physique de l'espace-temps, les arguments relationnistes ne risquent-ils pas de se retourner *in extremis* en faveur du substantialisme<sup>2</sup> ?

#### LA FORME ESPACE-TEMPS

Si la querelle qui oppose relationnistes et substantialistes a souvent les apparences d'une querelle de mots, c'est que le statut du champ métrique associé à l'espace-temps reste intrinsèquement ambigu. Rapporté à l'espace-temps, il conforte la

1. Cf. John Norton, « The Hole Argument », in *The Stanford Encyclopaedia of Philosophy*, 1999 (<http://plato.stanford.edu/entries/spacetime-holearg/>).

2. Le programme même de la géométrie dynamique, défendu dans les années 1950 par John Archibald Wheeler, confirme une telle possibilité, bien qu'il n'ait pas abouti. La théorie de la gravitation avait été réduite, dans le cadre de la relativité générale, à une description géométrique de l'espace-temps. Dans le même esprit, la géométrie dynamique se proposait de réduire l'électromagnétisme et même la physique des particules élémentaires en les incorporant à la structure géométrique de l'espace-temps.

position substantialiste ; rapporté à la matière, il fait immanquablement resurgir les objections relationnistes, qui se nourrissent de l'écart peut-être irréductible entre la forme espace-temps et son contenu physique.

Il ne nous appartient pas de trancher ces débats évoqués à grands traits dans les paragraphes qui précèdent. Notre ambition est à la fois plus limitée et plus fondamentale : nous aimerions préciser pour conclure en quel sens il convient d'entendre l'expression « forme espace-temps » à laquelle nous avons déjà eu plusieurs fois recours, parce qu'elle nous semblait constituer le présupposé ou l'horizon commun de toute la discussion.

Pour avancer dans ce sens, et sans prétendre apporter ici autre chose que des amorces, c'est sur le concept de forme qu'il faut maintenant faire porter l'effort. On sait la fortune de ce mot dans la tradition de l'idéalisme transcendantal. Il n'est pas mauvais d'y revenir, pour mieux prendre la mesure de ce qui nous sépare de Kant, ou des aménagements que sa pensée devrait subir pour pouvoir absorber les effets de la révolution relativiste. À condition de préciser que c'est moins du côté de l'Esthétique transcendantale que de l'Analytique des principes qu'il convient de se tourner : espace et temps, ressaisis dans leur nouage au sein de l'espace-temps, sont moins des formes *a priori* de la sensibilité entrant dans la constitution de l'objet en général, que des principes de coordination nécessaires à la représentation d'une nature gouvernée par des lois objectives. Les trois analogies de l'expérience qui, prises ensemble, fournissent le principe de la détermination de l'existence des phénomènes dans le temps, sont en ce sens le pendant non dialectique du problème cosmologique. Il est frappant d'y retrouver la catégorie de substance associée à un principe de permanence. Ainsi, c'est la durée elle-même qui fournit le substrat du changement ; mais il est nécessaire de la penser dans sa relation aux principes de liaison fournis par la deuxième et la troisième analogie.

Les trois analogies de l'expérience définissent ensemble une forme espace-temps *sui generis*, distincte des intuitions pures de l'espace et du temps décrites dans l'Esthétique transcendantale. Même Bergson, aussi éloigné qu'il semble de la manière kantienne de poser le problème cosmologique, mobilise des sché-

mas de pensée qui font écho à ceux de la *Critique de la raison pure* lorsqu'il s'interroge sur le type d'unité qu'il convient d'accorder à l'univers matériel pris en totalité. Certes, il ne s'agit plus alors de connecter des substances, mais des durées. D'où l'enjeu que représente le remaniement du concept de temps en relativité, et le danger de sa fragmentation ou de son atomisation apparentes, sous la figure des horloges diversement ralenties par les vitesses relatives qu'on leur suppose. Mais *Durée et Simultanéité* pose, fondamentalement, le problème de la connexion, qui était déjà celui de Kant, qui le recevait de Leibniz et de Wolff. Bergson est seulement contraint d'inventer une forme de coexistence qui n'aïlle pas jusqu'à la communauté, qui ne présuppose pas, — comme c'est encore le cas chez Kant avec le schème de l'action réciproque mis à profit dans la troisième analogie, — une interaction universelle des substances, elle-même gagée sur l'idée d'action instantanée à distance.

Si la théorie de la relativité introduit une nouveauté en philosophie, c'est peut-être moins en effet à travers le principe de relativité considéré en lui-même, qui représente seulement une extension au domaine des interactions électromagnétiques de l'ancien principe énoncé dans sa forme générale par Galilée, qu'à travers le principe de localité qui veut que toute propagation d'influence se fasse de proche en proche, à vitesse finie. Que la vitesse constante de la lumière, invariante dans tous les référentiels d'inertie, constitue également une vitesse *limite* est ici le résultat fondamental. Il a pour conséquence directe d'interdire toute totalisation immédiate de l'espace sous la forme de l'action instantanée à distance : telle est l'idée que porte la relativité de la simultanéité. En somme, la coexistence des substances — ou des durées — ne peut plus se penser sur la toile de fond de l'espace. S'il n'y a plus de plan de simultanéité absolue, il faut penser la connexion elle-même « en durée », comme dit Bergson, plutôt que dans un rapport de juxtaposition spatiale.

Le principe de la solution bergsonienne à cette nouvelle donnée du problème se heurte, bien entendu, au fait que la durée mesurée du physicien est elle-même d'emblée homogène

à l'espace. C'est bien pourquoi la confrontation avec la relativité réactive les enjeux les plus profonds du bergsonisme. Il n'est pas question d'y revenir ici, mais seulement d'indiquer une dernière fois, pour finir, le déplacement opéré par la formulation transcendante du problème cosmologique. En introduisant la catégorie de substance en même temps que les principes de connexion au sein du dispositif des trois analogies de l'expérience, Kant suggère une manière d'échapper aux controverses épuisantes entre substantialistes et relationnistes, en même temps qu'il lègue aux métaphysiciens contemporains la tâche difficile d'ajuster à la révolution relativiste des cadres de pensée encore newtoniens. Cela même est-il possible ? L'exemple de la confrontation tentée par Bergson incite à une certaine prudence. Mais une chose est certaine : si l'on s'intéresse à la forme espace-temps, il n'y a plus à jouer la relation *contre* la substance. La substantialité de l'espace-temps se manifeste à travers le type de connexion qu'il opère entre les substances matérielles, ou les durées singulières distribuées à travers la totalité de l'univers : elle est affaire de *consistance*.