Réalisme relativiste

Marc Lachièze-Rey

Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/cpuc/1372>

DOI : 10.4000/cpuc.1372

ISSN : 2677-6529

Éditeur

Presses universitaires de Caen

Édition imprimée

Date de publication : 15 décembre 2008

Pagination : 245-258

ISBN : 978-2-84133-332-5

ISSN : 1282-6545

Référence électronique

Marc Lachièze-Rey, « Réalisme relativiste », *Cahiers de philosophie de l'université de Caen* [En ligne], 45 | 2008, mis en ligne le 04 septembre 2020, consulté le 02 février 2023. URL : <http://journals.openedition.org/cpuc/1372> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/cpuc.1372>

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

RÉALISME RELATIVISTE

Le point le plus crucial, à propos de la réalité des objets physiques, consiste sans doute à éclaircir la signification du terme « réel ». Je ne m'y risquerai pas ici. En tentant de ne pas sortir de mon rôle de physicien, j'adopterai plutôt une définition particulière et limitée du terme, qui correspond peu ou prou à ce que Arthur Fine qualifie d'« attitude ontologique naturelle »¹.

L'« humble raisonnement »

J'introduirai ici une notion de « réalité » opérante, restreinte car subordonnée à une théorie physique donnée. J'écrirai en revanche le terme Réel (et les termes dérivés) avec une capitale pour désigner une Réalité « ontologique » sur laquelle, en tant que physicien, je ne me prononcerai pas. Ainsi lorsque j'utiliserai le terme sans majuscule, ce sera pour désigner la réalité dans le cadre de telle ou telle théorie.

Je soutiens en effet que chaque théorie physique, qu'il s'agisse de la physique newtonienne, de la relativité, de la physique quantique ou de quelque autre, implique assez précisément que les objets qu'elle manipule, et leurs attributs, puissent être qualifiés de « réels », du moins pour certains d'entre eux. En d'autres termes, une théorie physique ne peut être bien construite que si elle définit ses « objets physiques », c'est-à-dire en définitive ce qu'elle considère comme réel, et dans cette perspective, un énoncé de la théorie

1. Cf. Fine 1984. Cette notion d'« attitude ontologique naturelle » est utilisée ici sans aucun élément d'« anti-Réalisme », mais plutôt hors du débat « Réalisme » – « anti-Réalisme ». L'expression d'« humble raisonnement » à laquelle je recours ensuite est empruntée à Fine 1984, p. 356 sq.

n'a de sens que s'il porte sur de telles entités réelles. Ainsi Thomas Kuhn va-t-il jusqu'à déclarer :

On entend souvent dire que des théories successives se rapprochent toujours plus de la vérité, ou en donnent des approximations de plus en plus exactes. Apparemment, des généralisations comme celle-ci ne concernent ni la résolution des énigmes ni les prédictions concrètes qui dérivent d'une théorie, mais plutôt son ontologie, c'est-à-dire l'adéquation entre les entités dont la théorie peuple la nature et « ce qui s'y trouve réellement ». [...] Il n'existe, me semble-t-il, aucune possibilité d'expliciter le sens d'une expression comme « ce qui s'y trouve réellement », en dehors d'une théorie particulière ; la notion d'une adéquation entre l'ontologie d'une théorie et sa contrepartie *réelle* dans la nature me semble par principe une illusion ².

Convenons que le physicien peut difficilement échapper à cette « attitude ontologique naturelle ». Aussi n'accorderai-je aucune portée *ontologique* absolue à cette notion de réalité. Quant à la Réalité, je ne sais ce que c'est ; je ne sais si le mot possède même un sens. J'abandonne la question aux épistémologues. La réalité d'une entité, selon une théorie, n'implique nullement sa Réalité. S'il en allait autrement, l'antagonisme entre théories physiques, tel celui qui oppose aujourd'hui les partisans d'une conception relativiste aux défenseurs d'une conception quantique³, serait intenable. Mais je déclare impossible de considérer tel ou tel objet comme Réel, sans rejeter un cadre théorique qui ne le considérerait pas comme réel : impossible de considérer un corpuscule localisable comme Réel sans rejeter la physique quantique qui ne le considère pas comme réel ; impossible de considérer l'espace ou le temps comme Réel, sans rejeter la relativité qui ne les considère pas comme réels (voir ci-dessous). Autrement dit, la réalité me paraît une condition nécessaire de la Réalité.

Objets physiques, objets réels

Les théories physiques changent. Chacune nous fournit « sa » représentation du monde sous forme d'un corpus de pensée exprimé en termes d'« objets physiques » et d'attributs, considérés comme

2. Kuhn 1984, p. 280-281. Cette citation est commentée par A. Fine (1984).

3. Voir Lachière-Rey 2004.

réels, de ces mêmes objets. Pour la physique newtonienne qui constitue sans doute l'exemple le plus familier, ce sont l'*espace* et le *temps*, qui définissent un cadre géométrique ; et les *particules*, dont la matière est constituée. Ces objets, et les attributs que la théorie leur accorde (masse, position, vitesse, etc. pour les particules) sont réels dans la théorie. Lorsque j'applique la physique newtonienne, peu m'importe que l'espace soit Réel ou non. Il me suffit qu'il soit réel. C'est l'un des atouts majeurs de la physique que de pouvoir opérer sans avoir à répondre à la question du Réel, sans se prononcer sur la Réalité des objets qu'elle manipule.

L'histoire nous apprend par exemple que la Réalité de l'espace absolu de Newton n'a cessé d'être contestée, tant par les philosophes que par les physiciens eux-mêmes. Dès le XVII^e siècle, Leibniz proposait une conception *relationnelle*, selon laquelle l'espace n'est que la conceptualisation des relations entre objets, en sorte qu'il est impossible de lui accorder une quelconque Réalité. Dans la même veine, Ernst Mach qualifia plus tard l'espace d'« entité métaphysique ». Mais rejeter la Réalité de l'espace ou du temps ne conduit-il pas au bout du compte à rejeter la physique newtonienne elle-même. Telle fut la démarche d'Einstein, qui lui substitua la théorie relativiste. Je m'intéresserai dans ces pages à la notion de réalité en relativité générale.

Connaissance, réalité et observateurs

Le type d'approche que nous défendons n'a rien à voir, comme on le verra, avec un réalisme empirique qui confondrait « réel » et « observable ». Ce qui existe réellement, selon un corpus de théorie physique donné, se distingue de ce que l'on peut connaître. Ce point est presque une banalité en physique quantique, mais je voudrais montrer qu'il en est de même en relativité générale, et sans doute dans toute théorie physique.

Les objets réels d'une théorie existent sans qu'il soit nécessaire que quiconque soit là pour les observer. En physique newtonienne, comme en relativité, une étoile ou une galaxie se trouve quelque part et possède certaines propriétés (sa masse au repos, sa charge, sa vitesse, etc.), indépendamment du fait qu'on l'observe ou non, indépendamment même de la possibilité de l'observer. Il en est de même pour une particule élémentaire (proton, photon, etc.). En physique quantique, c'est la fonction d'onde (ou le champ quantique) qui existe, avec ses attributs bien réels, indépendamment de la présence de tout observateur. Tous ces éléments appartiennent

à la réalité objective de la théorie, sans préjuger de la possibilité de les connaître.

Mais, lors même qu'elle nous propose une conception de la réalité du monde et en décrit le comportement, chaque théorie physique doit nous dire *ce que l'on peut connaître* de cette réalité, et comment le faire. Selon les termes d'Einstein, elle doit décider de ce qui est mesurable. Dans le cadre de la relativité générale, la question des observations ou des mesures ne peut être abordée sans faire intervenir la notion d'*observateur* ni préciser son statut ; d'une manière qui se révélera très analogue à celle de la physique quantique. Dans les deux cas, « connaître », ou « mesurer », est un processus que la théorie décrit comme une interaction entre deux systèmes : celui qui observe – l'observateur – et celui qui est étudié. Les deux systèmes (notamment l'observateur) appartiennent à la réalité de la théorie ; le processus d'observation est un processus physique comme les autres : une interaction entre systèmes, mais où l'un des systèmes est l'observateur. Notons toutefois que l'ancienne interprétation (dite « de Copenhague ») de la physique quantique ne répondait pas à ce schéma. Mais la conception que je soutiens ici ne s'oppose pas à la définition de la réalité que donne Einstein dans son célèbre article EPR. M'intéressant ici à la physique relativiste (et non pas quantique), je laisserai ce débat ouvert.

En physique newtonienne, rien n'interdit en principe de connaître, par exemple, tous les attributs des corpuscules. Mais selon d'autres théories, telle, comme on le sait, la physique quantique, une partie de la réalité peut rester hors d'atteinte. La théorie quantique décrit par exemple un électron, non comme un corpuscule mais comme une fonction d'onde, objet réel de la théorie. Mais dans le même temps, elle interdit de connaître tous les attributs de cette fonction d'onde, bien qu'ils soient parfaitement réels. L'observateur peut connaître *certaines* éléments de cette réalité, mais pas certains autres, qui pourtant sont tout autant réels : tout ce qui est réel n'est pas connaissable ! Je soutiendrai que la situation est analogue en relativité générale.

Éléments de réalité newtonienne

Le corpus newtonien repose sur le postulat d'existence de corpuscules matériels, dans un cadre géométrique constitué de l'espace et du temps, lesquels sont déclarés réels également. Sur la base de tels présupposés, la théorie décrit de manière unifiée (avec un nombre limité de lois simples) une multitude de phénomènes. Elle

possède une forte capacité prédictive qui peut être vérifiée par l'expérience ou l'observation.

Quoique la Réalité de l'espace absolu newtonien ait été vivement contestée, il reste que la théorie est construite à partir de la réalité de l'espace et qu'elle fonctionne ainsi. Le philosophe ou l'épistémologue restent libres de décider dans quelle mesure l'espace peut être considéré comme faisant partie de la Réalité du monde. Mais s'il répond par la négative, il est contraint de rejeter la physique newtonienne et d'adopter une autre conception du monde.

Le physicien newtonien, et sans doute Newton lui-même qui était déjà parfaitement conscient de ce problème, adopte l'« attitude ontologique naturelle » : mettant de côté tout l'attrail critique, il opère sur des particules réelles, dans l'espace et dans le temps réels. Rien ne lui interdit, une fois déposé son tablier de physicien, d'argumenter pour déterminer s'il s'agit là d'« entités métaphysiques », selon l'expression d'Ernst Mach, que ses critiques virulentes de la notion d'espace newtonien n'ont d'ailleurs pas empêché de rédiger un traité de mécanique.

Quant au *temps* de la physique newtonienne, il a la propriété d'être symétrique : le futur est équivalent au passé. Il n'en est pas de même dans le corpus thermodynamique, où le second principe énonce que l'entropie ne peut croître que du passé vers le futur, et distingue donc les deux : la réalité du temps n'est donc pas la même dans les deux corpus. Nous verrons que, comme pour l'espace, celle-ci disparaît dans le corpus relativiste.

Même si telle ou telle théorie connaît d'excellents succès expérimentaux et observationnels, rien ne garantit pour autant que ses éléments de réalité correspondent à la Réalité de notre Monde. Venons-en aux éléments de réalité dans le corpus relativiste.

Qu'est-ce que la réalité relativiste ?

Présentée comme une théorie géométrique, la relativité générale s'inscrit dans la continuité de la physique newtonienne dont l'espace et le temps forment le cadre. Si la relativité générale ne les tient plus pour réels, puisqu'il n'est même pas possible en général de les définir dans ce contexte, la théorie admet toutefois un nouveau cadre géométrique constitué par l'espace-temps. Pour examiner la question du temps, penchons-nous d'abord sur les notions de durée et de simultanéité.

Durée et simultanéité

Considérons deux phénomènes physiques bien définis : par exemple, deux explosions d'étoiles ; ou bien la création puis l'annihilation d'une particule. Face à la question « quelle durée s'est écoulée entre les deux événements ? », la relativité générale déclare qu'il n'y a pas de réponse, plus encore qu'il ne peut y en avoir.

Un observateur peut mettre sur pied un protocole expérimental (ou observationnel) dans le but de mesurer cette durée : il trouvera bien un résultat. Mais un autre observateur, appliquant un protocole identique, trouvera un résultat différent. Il est impossible de définir quelque chose que l'on appellerait *la durée entre deux événements*. Les deux événements se sont-ils alors déroulés *simultanément* ? Encore une fois, un observateur peut concevoir un protocole pour décider ce point, et répondra par exemple par l'affirmative. Un autre, appliquant le même protocole déclarera que l'événement A s'est déroulé « avant » l'événement B ; un troisième enfin que B s'est déroulé « avant » A (si toutefois on suppose les deux événements non causalement liés). Force est d'en conclure qu'on ne peut pas définir une notion de simultanéité. C'est cette impossibilité, découverte par Einstein avant la mise au point définitive de sa théorie, qui a constitué pour lui le fil conducteur principal dans l'élaboration de la relativité restreinte.

Pas de durée ni de simultanéité, donc pas de notion de temps dont durée et simultanéité sont des attributs essentiels. Nous verrons par la suite quelles sont les caractéristiques de ce que l'on qualifie parfois (improprement) de « temps » dans la théorie. Mais l'espace ne présente pas davantage de réalité, et cette double constatation donne à Einstein l'élan qui le conduit à la théorie de la relativité restreinte. Plus tard, les travaux de Minkowski et Poincaré montrèrent que l'on pouvait prêter une réalité à un cadre géométrique plus global : l'*espace-temps*, que, dans son acception courante, la relativité, restreinte ou générale, considère comme réel, en lui assignant certains attributs : sa métrique, sa courbure, sa connexion, toutes ces notions étant liées, ou en d'autres termes des quantités réelles, mesurables (sous certaines conditions), et d'ailleurs mesurées au moins partiellement, par exemple en cosmologie. Ces attributs dictent à la matière son comportement. Elles représentent ce que l'on appelle la *gravitation*. À tous égards, ces notions qui caractérisent l'espace-temps ont autant de réalité que la matière elle-même que nous envisagerons plus loin. Prenons la courbure par exemple ; s'il est admis qu'elle constitue sans aucun doute un élé-

ment de réalité de la théorie, l'interprétation habituelle la tient pour un attribut de l'espace-temps lui-même, ce qui conduit à lui accorder le même statut de réalité. Il est pourtant possible d'adopter une interprétation différente : la courbure est bien quelque chose de réel au sein de la théorie, mais on peut fort bien considérer que ce n'est pas un attribut de l'espace-temps. En conservant la réalité de la courbure, regardée comme un objet défini par lui-même, on rejetterait ainsi la réalité de l'espace-temps. Quoique longtemps oublié, ce point de vue, qui fut celui d'Einstein lui-même, ressuscite aujourd'hui, sous la forme de ce que l'on appelle les approches « relationnelles » [*background-independent*] : la courbure, objet réel, représenterait alors le champ de gravitation et son statut serait du même ordre que celui qu'on accorde au champ électromagnétique, ou à d'autres champs qui représentent la matière ; et ce que l'on appelle l'espace-temps ne serait qu'une *commodité* sans existence réelle.

Les objets de la relativité générale

En relativité générale, la plupart des objets physiques sont décrits par des entités mathématiques bien définies appelées « tenseurs ». Ce sont des « objets naturels », dans un sens mathématique précisément déterminé, lié à la géométrie de l'espace-temps⁴. Les plus simples de ces tenseurs sont les *fonctions*⁵ ; mais il y a également les *vecteurs* et les *formes*. Le champ magnétique par exemple est représenté par une forme.

On ne peut en général pas mesurer des tenseurs, on ne peut mesurer que des nombres⁶. Mais les tenseurs jouissent de la propriété (c'est même leur définition) d'agir les uns sur les autres. Par exemple, l'action d'un tenseur sur un autre tenseur peut donner un nombre (plus exactement une fonction, mais à partir de laquelle on peut obtenir des nombres). Ainsi, les tenseurs appartiennent à une catégorie plus générale d'objets pouvant « opérer » les uns sur les autres.

4. Un objet « naturel » se transforme d'une manière bien déterminée lorsque l'on procède à un déplacement dans l'espace-temps : c'est une section d'un « fibré naturel ».

5. Une fonction est un opérateur qui assigne un nombre à chaque point de l'espace-temps. Les fonctions représentent les objets les plus simples qu'on puisse considérer en relativité générale, à savoir ce que l'on appelle les *champs scalaires*. Mais à notre connaissance, il n'existe pas de champ scalaire dans la nature (sauf peut-être le « champ de Higgs » qui reste toutefois encore hypothétique).

6. On décrit souvent un tenseur par ses *composantes*, qui sont des nombres, mais ces nombres ne constituent pas des éléments de réalité.

Je les qualifierai d'« opérateurs », car ce terme convient mieux à ce que nous cherchons à cerner puisque certains opérateurs associés à des objets physiques ne sont pas des tenseurs, par exemple, des « connexions ». La règle fondamentale de la relativité générale peut alors être énoncée ainsi : *tout objet réel est représenté par un opérateur agissant sur les tenseurs* ; et cette définition inclut les tenseurs eux-mêmes.

Réalité des systèmes physiques en relativité générale

Du côté *géométrique*, on associe à l'espace-temps sa métrique g , sa connexion D , et sa courbure R , que l'on peut exprimer sous plusieurs formes, et toutes ces déterminations sont des opérateurs. Un système physique *matériel* est une entité réelle, caractérisée par un ensemble d'opérateurs. Pour un système complexe, cet ensemble peut être assez compliqué. Dans la plupart des cas, on peut au moins associer à un système un opérateur particulier, son *tenseur d'énergie-impulsion* noté T .

Le système le plus simple que l'on puisse considérer est constitué tout simplement d'une unique particule. On lui associe au moins un opérateur particulier, sa vitesse U . C'est un tenseur⁷ qui, comme opérateur, peut agir sur les autres tenseurs. Par exemple, U agit sur le tenseur métrique g de l'espace-temps⁸. Cette action s'écrit $g(U, U) = 1$, où l'opération donne toujours le nombre 1. Cette loi s'applique à tout objet matériel, et rappelle que le mouvement d'un système est une forme particulière d'interaction de ce système avec l'espace-temps. Dans le cas d'une particule libre, le mouvement est défini par l'équation $g[U, D(U)] = 0$, appelée *équation géodésique* ; il s'agit alors d'un cas particulier d'interaction entre la particule et la géométrie de l'espace-temps, caractérisé par l'interaction correspondante entre les opérateurs concernés. Pour un photon, particule de *rayonnement* plutôt que de matière, l'action de la métrique sur la vitesse s'écrit $g(U, U) = 0$, ce qui indique que le photon se déplace dans l'espace-temps à la vitesse de la lumière.

Réalité et observations

Le résultat d'une mesure doit se présenter sous la forme d'un nombre, et par ailleurs ne peut faire intervenir que des éléments réels.

7. La vitesse est un quadrivecteur, c'est-à-dire une forme de tenseur parmi les plus simples. On peut tout aussi bien considérer que c'est le tenseur g qui agit sur U .

8. On peut tout aussi bien considérer que c'est le tenseur g qui agit sur U .

La seule possibilité qui s'offre à nous est alors de concevoir que la mesure s'exprime comme une action entre opérateurs qui fournit un nombre. L'un des opérateurs caractérise l'observateur ; un autre le système observé ; et les opérateurs spatio-temporels caractérisent l'espace-temps au sein duquel la mesure est effectuée. Il est impossible de rendre compte du processus d'observation en relativité sans faire intervenir l'observateur et ses attributs. En tant que système physique, l'observateur est caractérisé par un ensemble d'opérateurs qui peut être assez compliqué, pour décrire un appareil de mesure par exemple. Mais cet ensemble comprend au moins un tenseur particulier, sa vitesse V . Lorsqu'il s'intéresse à un système physique, l'observateur fait agir ses opérateurs sur les opérateurs du système et ceux de l'espace-temps.

Prenons le cas le plus simple, celui où l'observateur de vitesse V s'intéresse à une particule de vitesse U , située au même endroit que lui. L'observation la plus élémentaire se traduit par la quantité $g(U, V)$ qui exprime l'intensité de la *vitesse relative de la particule par rapport à l'observateur*. Une autre opération, plus élaborée, entre opérateurs donnerait la direction du déplacement de la particule par rapport à l'observateur.

Un système plus complexe, par exemple un ensemble de particules ou un champ, serait caractérisé par son *tenseur d'énergie impulsion* T . Ce dernier agit sur la vitesse de l'observateur, et dans ce cas le résultat $T(V, V)$ est l'*énergie du système vue par l'observateur*. Notons qu'un autre observateur, de vitesse V' , mesurerait une énergie $T(V', V')$ différente. Le système et son tenseur d'énergie impulsion sont réels, bien qu'inobservables dans leur intégralité ; l'observateur et sa vitesse sont réels eux aussi ; mais l'« énergie du système » ne l'est pas : la notion n'est tout simplement *pas définie*. En revanche l'« énergie du système du point de vue d'un observateur » est réelle, même si elle diffère d'un observateur à l'autre.

Souvent, l'observateur observe une particule située loin de lui, de vitesse U , en enregistrant la lumière qu'elle émet. Cette lumière est décrite comme la propagation d'un photon. Bien réel lui aussi, ce photon est caractérisé par son vecteur quadrivitesse noté K , qui vérifie $g(K, K) = 0$. En appliquant la métrique aux différents tenseurs caractérisant la particule observée (U), le photon (K) et l'observateur (V), on peut mesurer diverses quantités. Par exemple, la combinaison $g(V, K) / g(U, K)$ constitue le *décalage vers le rouge* [*redshift*] de la particule, qui peut être une galaxie lointaine. D'autres combinaisons fournissent d'autres quantités mesurables.

Prenons un autre exemple. Un champ électromagnétique est caractérisé par un tenseur électromagnétique F^9 . L'action $E = F(V)$ de ce tenseur sur la vitesse de l'observateur donne le *champ électrique* vu par l'observateur ; une autre action donne le *champ magnétique*. Un observateur différent verrait des champs électrique et magnétique différents. Le champ électromagnétique est réel, mais les champs électrique et magnétique ne le sont pas. Seuls sont définis (et réels) les champs électrique et magnétique *pour un observateur donné*, et à la position où il se trouve seulement.

L'espace et le temps

Si, de la même manière, on ne peut définir une *durée*, ou une *distance*, entre deux phénomènes A et B, peut-on au moins définir ces notions *du point de vue d'un observateur*? En général, non, mais c'est cependant possible dans le cas particulier où les deux événements A et B font directement intervenir l'observateur, si par exemple on considère deux de ses anniversaires successifs : la durée (tout court) entre deux anniversaires n'a pas de sens. En revanche, la durée entre deux de mes anniversaires mesurée par moi est bien définie. Elle est appelée *durée propre*, et vaut un an. La durée entre deux de mes anniversaires *pour un autre observateur* peut être définie dans certains cas, mais elle prendra une toute autre valeur, ce qui peut être exprimé par le pseudo-paradoxe des jumeaux de Langevin¹⁰. Ainsi la notion de durée n'a pas de réalité, pas même du point de vue d'un observateur, sauf dans quelques cas très particuliers. Un langage « vulgarisé » utilise souvent le terme de « contraction » ou de « dilatation » des durées, mais il n'y a rien de tel en relativité, tout simplement parce qu'il n'y a pas de durée, sauf cas particuliers.

Considérons par exemple deux explosions de supernovae, A et B, dans le ciel. Il n'existe aucun observateur qui participe aux deux événements, donc aucune durée, ni durée propre, entre les deux. Je puis définir ma durée propre qui sépare les deux événements A' et B', les moments où je reçois les lumières en provenance d'A et de B, mais ce n'est en aucun cas la durée entre A et B. Un autre observateur mesurera sa durée propre entre A'' et B'', les moments où il reçoit les lumières, mais cela n'aura rien à voir avec la durée propre que j'aurai moi-même mesurée. Et il n'existe aucun phénomène

9. Il s'agit en l'occurrence d'une *2-forme*, qui est un cas particulier de tenseur.

10. Voir par exemple Klein 2003, en particulier le chapitre « Espace-temps ».

de « dilatation » ou de contraction », car il n'existe aucune durée, ni durée propre entre les deux événements A et B.

Considérons un autre cas de figure, celui d'une particule issue du rayon cosmique, un muon par exemple : sa création constitue un premier événement A bien défini ; son annihilation un second événement B non moins défini. Il existe cette fois une durée propre, entre les deux, celle du muon lui-même, $T_{\text{muon}}(AB)$. Je peux (indirectement) observer les deux événements, en recevant des signaux émis aux moments de la création (A') et de l'annihilation (B'). Entre ces deux événements qui me concernent, je peux en effet définir et mesurer ma durée propre $T_{\text{obs}}(A'B')$. Mais les deux valeurs $T_{\text{muon}}(AB)$ et $T_{\text{obs}}(A'B')$ n'ont rien à voir l'une avec l'autre, et ne mesurent pas la même grandeur ; il n'y aurait aucun sens à dire que l'une correspondrait à une « dilatation » ou une « contraction » de l'autre, bien que ce langage soit constamment et improprement utilisé. Quant à « ma durée propre » entre les deux événements A et B, il n'existe aucun moyen de la définir¹¹ : puisque ces deux événements ne me concernent pas, ils ne relèvent pas de mon temps propre. Il n'y a là non plus ni dilatation ni contraction.

Permettre de définir la durée entre phénomènes est une des propriétés de ce que l'on appelle *le temps*. Le fait de ne pas pouvoir le faire en relativité générale nous met dans l'impossibilité d'y considérer le temps comme un élément de réalité, et ce constat est encore conforté si l'on ajoute que simultanéité et chronologie ne peuvent être davantage définies¹². Même le « temps selon un observateur » reste indéfini. Seules sont définies et mesurables les durées propres ; mais chacune ne l'est qu'aux positions précises, dans l'espace-temps, qu'occupe l'observateur correspondant, et elles diffèrent toutes les unes des autres.

La notion d'espace présente des difficultés similaires, mais aucun problème ne surgit lorsque l'on s'avise de considérer l'*espace-temps* comme réel dans la théorie. Cette conception n'est certes pas nouvelle ; c'est celle que Minkowski défendait déjà en 1908 :

-
11. Pour répondre à une possible objection, on pourrait aussi dire qu'il en existe « trop » : je puis mettre sur pied un protocole d'observation dont le résultat me donnerait quelque chose que j'appellerai « durée propre » (et c'est dans ce sens-là que le terme est parfois utilisé). Mais il existe une infinité de tels protocoles possibles, qui peuvent fournir (à peu près) n'importe quelle valeur de la durée propre, ce qui revient à dire qu'elle n'est pas définie.
 12. On ne peut définir ces notions stricto sensu bien que l'on puisse, au moins partiellement, les définir *du point de vue d'un observateur*.

La conception de l'espace que je voudrais développer devant vous a grandi sur le sol de la Physique expérimentale. C'est ce qui fait sa force. La tendance en est radicale. 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 encore¹³.

Mais le moins que l'on puisse dire est que la conviction que professait Minkowski s'est quelque peu affaiblie. Cette notion de réalité de l'espace-temps est cependant tout à fait pertinente puisque, entre deux événements A et B, il est *toujours* possible de définir un *intervalle d'espace-temps*, alors qu'il est en général impossible de définir une durée ou une distance. Bien plus, cet intervalle d'espace-temps est identique pour tous les observateurs : c'est donc un élément de réalité intrinsèque aux deux événements, dont la nature n'est ni spatiale ni temporelle¹⁴. Par exemple, la valeur de l'intervalle spatio-temporel qui nous sépare d'une galaxie très lointaine que nous observons vaut zéro¹⁵, or il n'existe aucun moyen de définir la « durée » ou la « distance » qui nous sépare de cette galaxie¹⁶.

Interprétation relationnelle

Finalement, la réalité de la relativité générale se distribue entre les systèmes matériels d'une part et la géométrie de l'espace-temps d'autre part. Les premiers, particules, fluides, champ électromagnétique, etc. sont tous munis d'attributs réels, représentés par des opérateurs, le plus souvent des tenseurs, parmi lesquels les observateurs. À l'espace-temps, réel lui aussi, sont associés d'autres opérateurs « spatio-temporels » comme la métrique, la connexion et la courbure. La plupart des mesures ou observations s'interprètent comme des interactions ternaires, faisant intervenir le système étudié, l'observateur et l'espace-temps.

13. Minkowski 1908, p. 499-500.

14. Que la nature de l'intervalle d'espace-temps ne soit ni spatiale ni temporelle s'impose à nous, bien qu'on qualifie souvent improprement cet intervalle de « durée » ou de « distance ».

15. Cette remarque s'applique d'ailleurs à tout objet que nous observons, car elle exprime le fait que nous observons cet objet, ou cette galaxie par l'intermédiaire du rayonnement électromagnétique, qui se propage à la vitesse de la lumière.

16. Encore une fois, on peut toujours définir des procédures dont le résultat donne quelque chose qui peut s'interpréter selon ces termes. Mais il existe une grande diversité de telles procédures, qui fournissent des valeurs différentes, si bien que les notions gardent toute leur ambiguïté.

Il n'y a dès lors pas d'ambiguïté : ce qui est réel est représenté par des opérateurs, matériels ou spatio-temporels. Nous avons considéré ces derniers comme les attributs de l'espace-temps, alors classé comme objet réel de la théorie. Mais l'interprétation *relationnelle* de cette même théorie rejette la réalité de l'espace-temps, tout en conservant la réalité des opérateurs spatio-temporels, lesquels sont considérés désormais comme attributs, non plus de l'espace-temps, mais des systèmes matériels, ou plus exactement des relations entre systèmes matériels. L'opérateur métrique g par exemple serait un attribut de l'ensemble des particules (ou des champs) peuplant l'univers, dans toutes leurs relations mutuelles. Cette interprétation ne change rien à la manière dont la théorie opère¹⁷. On s'aperçoit, en relisant Einstein, que ce point de vue est très proche de celui qu'il adoptait lui-même sur sa propre théorie. Jusque récemment, cette interprétation n'a pourtant été que rarement invoquée : que peut-on y gagner, si cela ne change rien aux prédictions de la théorie ? En dehors de son intérêt épistémologique, elle ouvre un débat fondamental et pertinent pour les recherches en cours. On sait que de nombreux indices suggèrent que la physique actuelle n'est pas satisfaisante¹⁸, notamment du fait de l'impossibilité de concilier relativité générale et physique quantique. Cet état de choses motive une recherche très active en vue d'une nouvelle théorie, plus globale, plus unifiée. Parmi les pistes étudiées, certaines consistent à envisager de quantifier la relativité générale. Se posent alors deux questions très complexes : que doit-on quantifier, et comment le quantifier ? Sans entrer dans les aspects techniques, je me bornerai à mentionner l'importance que revêt alors l'interprétation – relationnelle ou non – de la relativité générale. Une école de pensée se fonde en effet sur l'interprétation relationnelle et adopte le précepte qui prescrit de décrire la nature de manière relationnelle. Les approches correspondantes [*background – independent*] comme par exemple la *gravité en boucles*, la *quantification canonique*, les *réseaux* (ou *écumes*) *de spin*, les *réseaux causaux*, etc. s'opposent à d'autres conceptions, comme celles de la *théorie des cordes* qui supposent un cadre géométrique fixé, dont les premiers dénoncent le caractère arbitraire.

17. Tout comme les différentes interprétations de la physique quantique n'affectent pas son caractère opérationnel.

18. Voir par exemple, Lachièze-Rey 2004.

J'ai tenté ici de montrer que la notion de réalité était, au moins partiellement, bien définie en relativité générale. J'en ai souligné différents aspects, qui témoignent d'une certaine ressemblance avec la notion de réalité en physique quantique : ce qui est réel n'est pas ce qui est connaissable. La réalité est représentable en termes d'opérateurs ; l'observateur joue un rôle fondamental ; le processus d'observation s'exprime comme une action de l'observateur sur le système observé, exprimée elle aussi en termes d'opérateurs, etc. Pour terminer, j'ai évoqué comment l'intérêt de la notion de réalité pourrait dépasser le cadre formel, dans l'optique de la recherche d'une nouvelle théorie physique. Comme ce fut souvent le cas dans l'histoire de la physique, les réflexions épistémologiques ou métaphysiques pourraient venir au secours de l'évolution scientifique.

Marc LACHIÈZE-REY

*CNRS – Laboratoire « AstroParticule et Cosmologie »
Université Denis Diderot – Paris 7*

Références bibliographiques

- FINE A. (1984), « The Natural Ontological Attitude », in *Scientific Realism*, J. Leplin (éd.), Berkeley, University of California Press, p. 83-107 (rééd. dans *Philosophie des Sciences II, Naturalismes et réalismes*, A. Barton (trad.), Paris, Vrin, 2004).
- KLEIN É. (2003), *Quand la science a dit « c'est bizarre »*, Paris, Le Pommier.
- LACHIÈZE-REY M. (2004), *Au-delà de l'espace et du temps*, Paris, Le Pommier.
- MINKOWSKI H. (1908), *Raum und Zeit*, Leipzig, Teubner (« Espace et Temps », A. Hennequin et J. Marty (trad.), *Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure*, 3^e série, t. XXVI, 1909, p. 499-517).