

L'espace et le temps existent-ils ? Le mystère de la gravité quantique

Baptiste Le Bihan, Université de Genève
A paraître dans *Implications Philosophiques*

I

La physique contemporaine pourrait bien nous livrer un enseignement incroyable, à savoir que l'espace et le temps n'existent pas fondamentalement. Le lecteur peu familier avec la physique aura probablement néanmoins entendu parler de la mécanique quantique et ses histoires étranges à propos de superpositions de chats morts et vivants, ou à propos de la relativité et de la dilatation du temps en fonction de la localisation dans l'espace-temps, et de l'environnement gravitationnel. Ces bizarreries, propres à ces théories, ne sont probablement qu'un début. En effet, ces deux théories, réputées incompatibles, ont motivé plusieurs tentatives de développer une nouvelle approche permettant de les unifier, en concevant celles-ci comme des approximations d'une théorie plus fondamentale. Et ces nouvelles théories nous décrivent un monde encore plus étrange.

Ces tentatives s'insèrent dans deux axes. Le premier axe vise à unifier la relativité générale et le modèle standard de la physique des particules¹, aboutissant à certains programmes de recherche dont le plus connu est celui de la théorie des cordes. Une motivation très forte derrière ce type de programmes est de trouver une théorie physique fondamentale, peut-être ultime, finale, qui décrive la réalité physique dans sa totalité. Le second axe vise à expliquer la gravité quantique, c'est-à-dire les phénomènes qui font intervenir à la fois des effets quantiques et des effets gravitationnels. Il existe au moins trois types de phénomènes de ce genre : les deux types de singularité que sont le *big bang* et les *trous noirs*, et la *structure fondamentale de l'espace-temps*. A cette échelle, l'énergie présente est suffisamment élevée pour faire intervenir des effets quantiques dans la fibre même de l'espace-temps. A la différence du premier axe, les théories relevant du second axe n'ont pas la prétention de se présenter comme des théories du tout, c'est-à-dire comme des théories finales, qui donneraient un point final à la physique théorique en exhibant la structure fondamentale de la réalité. Il est commun de nommer l'ensemble des programmes appartenant à ces deux axes « gravité quantique », une expression qui désigne ainsi non pas une théorie particulière mais l'ensemble des entreprises visant à progresser dans notre compréhension des phénomènes faisant intervenir gravité et aspects quantiques.

Par delà la physique extrêmement compliquée que l'on trouve dans ces programmes, il existe une idée relativement simple à appréhender mais provoquant un niveau de fascination rarement atteint dans toute l'histoire du développement scientifique. Je parle ici d'un émerveillement au moins aussi fort que les idées de non-localité, ou d'univers multiples composant un multivers. Cette idée est que, fondamentalement, l'espace et le temps n'existent pas². Cette hypothèse que l'espace et le temps tels que nous les percevons ordinairement, ou même que l'espace-temps relativiste décrit par la relativité générale, « émergent »³ d'une autre structure peut signifier deux

¹ Le modèle standard de la physique des particules est une théorie (et non un modèle, malgré son nom), utilisant la théorie quantique des champs dans le cadre d'une ontologie de particules (sur les rapports entre « théorie quantique

² Bien que ces idées aient été défendues par des philosophes dans le passé, notamment par Kant, il est important de noter ici que cette disparition du temps et de l'espace ne revient pas à souscrire à un anti-réalisme scientifique : l'idée est plutôt qu'en adoptant le réalisme scientifique, on a de bonnes raisons de croire que la réalité, fondamentalement, n'est ni spatiale ni temporelle.

³ Je mets ici le terme « émergence » entre guillemet pour signaler que celui-ci a des usages distincts en philosophie générale et en philosophie de la gravité quantique. En philosophie générale, l'émergence est une notion spécifique qui connote l'idée de nouvelles propriétés apparaissant au niveau émergeant, avec l'idée que cette émergence n'est pas simplement épistémique. En philosophie de la gravitation quantique, le terme « émergence » est plus le nom d'un problème que celui d'une notion particulière. L'émergence doit alors être considérée comme une notion neutre

choses. Ou bien que l'espace, le temps et l'espace-temps n'existent tout simplement pas, qu'il s'agit d'illusions perceptives, et d'artefacts conceptuels et mathématiques logés dans nos théories physiques actuelles les plus fondamentales (la relativité générale et la théorie quantique des champs). Ou bien que l'espace, le temps et l'espace-temps (ou l'une ou l'autre de ces trois entités) existent bel et bien, mais de manière *dérivée, non-fondamentale*. Que l'espace et le temps soient des illusions, ou des sortes d'entités non-fondamentales quelque peu mystérieuses, les conséquences ontologiques sont massives et méritent d'être étudiées par les philosophes. Dans cet essai, nous allons présenter succinctement deux approches en gravité quantique qui entraînent vraisemblablement que l'espace et le temps n'existent pas fondamentalement, et discuter ensuite les interprétations philosophiques possibles de cette émergence de l'espace-temps. Ces points seront discutés selon une approche philosophique⁴.

La première question qui vient en tête lorsqu'on rencontre cette idée que le temps et l'espace n'existent pas est de savoir ce qui existe à la place de l'espace et du temps. A quoi ressemble la structure fondamentale, qui déclenche d'une manière ou d'une autre, *notre* monde spatio-temporel ? Que trouve-t-on derrière le voile spatio-temporel ? A quoi ressemble la structure non-spatio-temporelle du monde dans lequel nous semblons évoluer ? L'ontologie et les mathématiques de ces structures dépendent de chaque programme en gravité quantique, et leurs élucidations est toujours en cours. Dans la suite, je présenterai succinctement les ontologies suggérées par les deux principaux programmes de recherche en gravité quantique : la *théorie des cordes* (section II) et la *gravité quantique à boucles* (section III)⁵. Je soutiendrai ensuite qu'il est fructueux de prendre les différentes conceptions ontologiques de la conscience en philosophie de l'esprit en modèles pour la construction de solutions au problème de l'émergence de l'espace-temps (sections IV et V)⁶.

II

La théorie des cordes est un nom générique qui correspond à un grand nombre de théories, chacune d'entre elle répondant aussi au nom de « théorie des cordes » ou « théorie des supercordes ». Ces différentes théories, qui se sont accumulées depuis les années 1980, résultent de la tentative de combiner la relativité générale avec le modèle standard de la physique des particules. Dit de façon très simplifiée, ces théories décrivent des entités à une dimension, les cordes, ou des entités à plusieurs dimensions, les branes, qui peuvent être ouvertes ou fermées sur elles-mêmes, et vivent dans un espace étrange, suffisamment étrange pour que l'on se demande si cette structure mérite bel et bien le nom « d'espace ». En effet, cet espace n'est pas structuré par trois dimensions spatiales et une dimension temporelle, mais par un nombre bien plus élevé de dimensions (dix ou onze suivant les versions de la théorie). Ces cordes peuvent vibrer selon une certaine fréquence. Les dimensions supplémentaires découlent des contraintes de cohérence posées par le développement mathématique de ces théories. Une idée intéressante est que ce que nous appréhendons comme des

qui désigne l'apparition, d'une manière ou d'une autre, de l'espace-temps (ou de l'espace et du temps), quelque soit l'interprétation philosophique donnée à cette notion d'émergence. Voir par exemple McLaughlin (1992) et Wilson (2015).

⁴ Pour une présentation en français par des physiciens, le lecteur pourra se tourner vers Lachièze-Rey (2008) ou encore Rovelli (2015). Pour une présentation en français, du point de vue de la philosophie de la physique, cf. Wüthrich (2013). Pour une introduction courte et synthétique en anglais, voir Matsubara (2017).

⁵ Pour donner une idée au lecteur, parmi les approches les plus populaires en gravité quantique, les approches suivantes rejettent un nombre plus ou moins important de propriétés usuellement attribuées à l'espace et au temps : théorie des cordes, gravité quantique à boucles, géométrie non-commutative, théorie causale des ensembles (voir par exemple Huggett et Wüthrich 2013), la théorie des champs de groupe (cf. Oriti 2016) qui pose l'émergence de l'espace-temps à partir d'une collection d'entités abstraites décrites par des groupes mathématiques, ou la transition d'une signature « euclidienne » à une signature « lorentzienne » (Bojowald & Brahma 2017, Brahma 2017).

⁶ Dans cet essai, je me concentre sur l'émergence de l'espace-temps relativiste, de l'espace, et du temps en ce qu'il a de commun avec l'espace. Pour une discussion de la disparition des aspects spécifiques au temps, en gravité quantique, cf. Kiefer (2011), de Saint-Ours (2011), Huggett, Vistarini, et Wüthrich (2013) et Le Bihan (2015b).

particules matérielles (les fermions tels que les électrons ou les quarks) et les particules vectrices des forces (les bosons tels que le gluon, le photon, et peut-être le graviton) ne sont pas réellement des particules. Ce sont des propriétés des cordes, à savoir des vibrations selon une certaine fréquence de ces cordes. Actuellement, cinq théories des supercordes ont été formulées : les théories des supercordes de type I, type IIA, type IIB, hétérotique E et hétérotique O. Ces dernières, à la différence des premières théories des cordes qui ne permettaient de rendre compte que des bosons, permettent également de rendre compte des fermions et supposent l'existence d'un espace constitué de dix dimensions.

A première vue, on pourrait croire que le problème de l'émergence de l'espace-temps dans le cadre de la théorie des cordes n'est pas problématique. En effet, il existe une notion, la *compactification*, qui permet de rendre compte de la relation entre la structure fondamentale, et l'espace-temps relativiste. Le terme de « compactification » désigne des propriétés topologiques des dimensions supplémentaires (j'entends par là les dimensions qui s'ajoutent aux quatre dimensions de notre bon vieil espace-temps relativiste) : ces dimensions ont la forme topologique d'un cercle en étant fermées sur elles-mêmes. Les effets de ces dimensions ne seraient perceptibles qu'à une échelle très petite, ce qui explique pourquoi nous ne les observons pas à notre échelle.

Le lecteur pourrait s'interroger sur la prétendue disparition de l'espace et du temps dans ce modèle. En effet, il semble que l'espace n'est pas éliminé de notre représentation du monde, mais plutôt qu'il subit des révisions conceptuelles importantes. Certes, cet espace est étrange de par son nombre de dimensions. Mais ce simple fait justifie-t-il de parler de *disparition* de l'espace ou de l'espace-temps ? Plutôt que de soutenir que l'espace ordinaire, ou que l'espace-temps relativiste, n'existe pas, pourquoi ne pas soutenir, plus vraisemblablement, que notre espace est différent de la manière dont nous nous le représentons usuellement ? La compactification ne montre-t-elle pas que les étrangetés de l'espace des cordes se résorbent lorsqu'on prend du recul, en « dézoomant » pour considérer des morceaux de réalité un peu plus gros ?

Toutefois, cet espace dans lequel vivent les cordes ne semble pas être l'espace-temps relativiste, et encore moins notre espace ordinaire (cf. Branderberger & Vafa 1989 ; Witten 1999 dans la littérature physique, et Huggett 2017, pour une discussion philosophique)⁷. Afin de pouvoir comprendre pourquoi il en va ainsi, il faut introduire le concept de *dualité*. Ce terme désigne le fait très surprenant que parmi les différentes théories des supercordes que l'on a construit, on trouve des *descriptions duales* d'un même système physique. Ces descriptions sont duales en ce sens que si l'on prend deux grandeurs G_1 et G_2 dans l'une des théories, et ces mêmes grandeurs dans la théorie duale, on observe une relation entre les deux grandeurs. La dualité désigne cette relation qui lie les deux théories duales dans leur ensemble, en liant systématiquement les grandeurs physiques impliquées dans les deux théories duales. Ces dualités existent entre l'ensemble des cinq théories, tissant un réseau de dualité, suggérant que ces dernières sont, d'une manière ou d'une autre, différentes facettes d'une même pièce, c'est-à-dire des théories émergeant à partir d'une théorie plus fondamentale mais hypothétique, la *théorie M*.

Keizo Matsubara décrit la dualité T, l'une des dualités particulières qui caractérisent les théories des cordes, de la manière suivante :

Lorsque l'une des dimensions supplémentaires utilisée dans la théorie des cordes est compactifiée en un cercle, il se produit quelque chose de surprenant. On découvre que, physiquement, il n'existe aucune différence réelle entre un très petit cercle et un très grand cercle. Si le rayon [de compactification de la dimension], dans l'une des solutions est R , cette solution ne peut pas être distinguée d'une autre solution dans laquelle le

⁷ La théorie des cordes est formulée dans le cadre d'un espace-temps relativiste. Cependant, ainsi que l'ont noté certains physiciens (cf. Branderberger & Vafa 1989, Witten 1999), cette structure diffère de l'espace-temps relativiste à proprement parler de bien des manières.

rayon est l_s^2/R , où l_s correspond à la « longueur » de la corde⁸ (Matsubara 2013, 481).

On observe qu'une théorie dans laquelle les cordes s'enroulent au sein d'une dimension dont le rayon de compactification mesure R , est liée par la dualité T à la théorie dans laquelle les cordes s'enroulent dans une dimension dont le rayon de compactification mesure l_s^2/R . Que les dimensions soient compactifiées de manière à ce que les cordes refermées sur elles-mêmes décrivent un rayon de taille R , ou au contraire un rayon de taille l_s^2/R , le monde décrit est exactement le même. Dit autrement, un monde dans lequel les cordes sont libres (i.e. ne sont pas enroulées) au sein d'une dimension D ayant un rayon R est parfaitement équivalent à un monde dans lequel les cordes sont enroulées au sein d'une dimension D' ayant un rayon de compactification mesurant l_s^2/R .

En somme, le même espace-temps émerge des deux structures fondamentales décrites par les deux théories des cordes. Parmi deux « espaces » duaux, l'un peut être plus petit que la constante de Planck alors que l'autre peut être plus grand que l'espace-temps relativiste (cf. Huggett 2017). Nous avons ainsi deux théories des cordes différentes, parfaitement équivalentes, l'une nécessitant l'existence d'un espace des cordes minuscules, et l'autre un espace des cordes titanesques. La théorie M semble pourtant nous dire que ces deux espaces ne sont que des approximations d'une même structure, des sortes d'artéfacts mathématiques qui décrivent différentes limites d'une même structure sous-jacente. Il est important de noter que l'approche dominante en philosophie des cordes est que ces duals ne correspondent pas à une situation de sous-détermination des théories par le monde empirique : ces duals sont appréhendés comme étant physiquement équivalents, c'est-à-dire, comme décrivant une seule et unique structure physique de diverses manières (voir par exemple Matsubara 2013, Read 2016, de Haro 2017, Huggett 2017). Il reste alors à comprendre la nature de la relation entre l'espace-temps relativiste, et cette structure cachée au-delà des descriptions duales.

Un autre phénomène fascinant, parfois⁹ associé à la théorie des cordes est qu'il est possible d'interpréter la structure dans laquelle vivent les cordes comme étant un *espace géométrique non-commutatif*, à certaines échelles d'énergie (cf. Greene 1999, 379-380 tr. fr. 2000, 412). Dans ce type de géométrie, la structure fondamentale est constituée de grandeurs qui ne commutent pas nécessairement. En d'autres termes, un rectangle dont les côtés mesurent x et y , ne possède pas toujours la même aire suivant que cette dernière est calculée en multipliant x par y , ou y par x . Ceci suggère que l'espace commutatif « ordinaire » pourrait être lui-même une approximation d'un espace non-commutatif, lorsque certaines conditions sont réalisées, de la même manière que l'espace euclidien est une approximation adéquate d'un espace non-euclidien lorsque la courbure de l'espace non-euclidien est négligeable. Du point de vue mathématique, la géométrie commutative peut être dérivée comme un cas particulier de la géométrie non-commutative. La question se pose à nouveau, comme elle s'était posée pour les espaces non-euclidiens mathématiques, pour les espaces non-commutatifs mathématiques, de savoir si ceux-ci représentent la structure de l'espace physique. La non-commutativité est une conséquence peut-être encore plus radicale et troublante que les dualités, dans la mesure où elle énonce explicitement que la structure fondamentale, qui fonde d'une manière ou d'une autre notre espace-temps, n'est même pas un espace, ou tout du moins, pas un espace au sens géométrique ordinaire du terme.

Les coordonnées des objets ne commutant pas, la question se pose de savoir si cette entité sous-jacente est mieux catégorisée comme un espace avec une géométrie non-commutative, ou

⁸ « When one of the extra dimensions used in string theory is compactified as a circle something surprising happens. It turns out that physically there is no real difference between a very small circle and a bigger one. If the radius in one solution is R this cannot be distinguished from a solution with radius l_s^2/R where l_s is the so-called string length ».

⁹ Notons qu'il n'y a pas de relation nécessaire entre la théorie des cordes et ces espaces géométriques non-commutatifs, et que la géométrie non-commutative est compatible avec d'autres approches de la gravitation quantique. Toutefois, historiquement, l'apparition d'une structure décrite par une géométrie non-commutative à une certaine échelle d'énergie a été appréhendée comme un résultat intéressant de la théorie des cordes.

comme une structure « purement algébrique » non-spatiale. Cette idée, étrange, revient à soutenir que la géométrie non-commutative est une manière de décrire une structure algébrique non-spatiale. La géométrie non-commutative, bien qu'étant une manière peut-être efficace de décrire la structure algébrique, n'entraînerait pas l'existence d'un espace physique. Ainsi, ce qui existe physiquement ne serait pas un espace décrit par la géométrie non-commutative, mais plutôt une structure physique algébrique. Cependant, il faut alors saisir la nature d'une telle structure algébrique *physique*, par delà la structure algébrique *mathématique* qui la représente. Ainsi, ici, il n'est pas question d'espaces mathématiques et de la possibilité de dériver certaines entités mathématiques à partir d'autres entités mathématiques. Il s'agit de déterminer, au-delà de nos représentations mathématiques, ce qui est réel, ce qui constitue le monde physique. En d'autres termes, le défi est de déterminer au sein de nos représentations mathématiques, ce qui reflète adéquatement le monde physique et ce qui n'est que « du bruit mathématique », des parties de l'outil mathématique qui ne reflètent pas le monde physique.

Avec ces géométries non-commutatives, en admettant qu'elles décrivent adéquatement le monde physique et sa structure fondamentale (au moins à certaines échelles d'énergie), notre conception naïve de l'espace est défigurée à un tel point que nous ne sommes plus alors qu'à deux doigts de soutenir qu'il n'existe tout simplement pas d'espace (en admettant que la commutativité des coordonnées d'un objet est une condition nécessaire de l'existence d'un authentique espace géométrique physique). Si l'on est prêt à s'engouffrer aussi profondément dans la remise en cause des propriétés de l'espace, pourquoi ne pas examiner dans ce cas certaines approches, encore plus radicales, qui soutiennent que la structure fondamentale de notre monde n'est pas une structure physique au sens ordinaire du terme, mais plutôt de l'information pure, voir un pure algorithme qui tournerait sur une machine (en gros, que nous vivons dans une simulation, à la manière du film *Matrix*) ? Bien sûr, ces hypothèses sont peu crédibles à l'heure actuelle, et nous n'aurons probablement pas besoin d'aller aussi loin dans le rejet des propriétés usuellement associées à l'espace. *But who knows*. Quoi qu'il en soit, la question de pose de savoir comment une structure à la géométrie commutative peut émerger d'une structure à la géométrie non-commutative.

Cette brève présentation ne nous dit bien sûr rien de la connexion qui existe entre la structure sous-jacente décrite par la théorie M, et l'espace-temps relativiste. Toutefois, comme l'explique Nick Huggett, ni cette structure sous-jacente, ni les structures approchées décrites par les théories duales, ne peuvent être identifiées à un espace-temps relativiste dans lequel on aurait simplement ajouté des dimensions compactifiées. Les deux structures (l'espace-temps relativiste émergent et la structure dans laquelle évoluent les cordes) sont topologiquement et qualitativement, et donc numériquement, distinctes et il semble ainsi que le programme de recherche sur les cordes pointe également dans la direction de l'absence de fondamentalité de l'espace et de l'espace-temps. Quant à savoir ce qu'est l'ontologie de la structure sous-jacente à la collection de théories des supercordes liées par ces relations de dualité, le mystère demeure. Tout ce que l'on peut conclure, c'est que si l'approche en termes de cordes venait à aboutir, cette structure ne serait pas identique à notre espace-temps.

III

Dans cette section, nous allons examiner plus brièvement en quel sens la gravité quantique à boucles décrit une structure fondamentale éloignée de nos conceptions ordinaires et relativistes de l'espace, du temps et de l'espace-temps. D'après la gravité quantique à boucles, l'espace-temps n'est pas fondamentalement réel (cf. Rovelli 2004, 2015). A la place, on trouve des *réseaux de spin*, sortes d'équivalents de l'espace. Ces réseaux sont constitués de nœuds et de liens entre ces nœuds, avec des grandeurs physiques associées aux nœuds et aux liens. Chaque relation spatiale émerge d'une manière d'une autre de l'existence de ces multiples liens et nœuds. Lorsqu'on applique une dynamique aux réseaux de spin, on obtient une « mousse de spin » qui est l'équivalent de l'espace-

temps quadri-dimensionnel de la relativité. Cette mousse de spin est supposée être suffisamment similaire à l'espace-temps relativiste pour expliquer le succès empirique de la relativité générale. Huggett et Wüthrich, par exemple, décrivent l'ontologie de la gravité quantique à boucles de la manière suivante :

Les entités supposées correspondre aux structures spatiales tri-dimensionnelles répondent au nom de « réseaux de spin ». Les réseaux de spin peuvent être appréhendés comme des réseaux de boucles entrelacées avec des représentations de « rotations » (« spins »), associées à la fois aux nœuds et aux arrêtes du réseau. Les représentations de spin associées aux nœuds quantifient les « volumes » quantiques et possèdent une valeur discrète. Les représentations de spin associées aux arrêtes quantifient les « aires » quantiques et correspondent à la surface adjacente des « volumes » connectés. Bien que la dynamique de la théorie soit loin d'être une affaire réglée, celle-ci devra décrire l'évolution des réseaux de spin à l'aide d'un opérateur hamiltonien approprié s'appliquant à eux. En termes généraux, l'action de l'hamiltonien sur un nœud du réseau de spin ou bien préserve son identité, i.e., le nœud persiste simplement à travers le « temps », ou bien elle scinde le nœud en plusieurs autres nœuds, ou bien encore, elle fusionne le nœud avec d'autres nœuds pour produire un unique nœud. La structure qui en résulte est l'analogie quantique d'un espace-temps quadri-dimensionnel et est appelée « mousse de spin »¹⁰ (Huggett et Wüthrich 2013, 279).

Comme l'expliquent Huggett et Wüthrich, la dynamique de la théorie n'est pas encore une affaire réglée, et en cela, la théorie est toujours en construction. Toutefois, notons que la structure fondamentale qui remplace l'espace-temps est dénuée de plusieurs propriétés usuellement attribuées à l'espace, posant à nouveau la question du lien entre cette structure et l'espace-temps décrit par la relativité générale. Premièrement, cette structure est discrète, constituée d'*atomes de structure*, par opposition à la structure continue qu'est l'espace-temps relativiste. Plus précisément, les volumes et les aires sont quantifiés en des morceaux insécables. En d'autres termes, la gravitation postule l'existence d'entités qui possèdent une *extension*, mais pas de *parties propres*, une idée étrange, mais pas forcément rédhibitoire (cf. Simons 2004, Braddon-Mitchell & Miller 2006, McDaniel 2007, Callender 2011, Baker 2016). Deuxièmement, la structure de l'espace-temps tel que nous la conceptualisons à l'aide de la relativité n'a pas toujours la même organisation que dans la structure fondamentale. En effet, il arrive que la contiguïté dans l'espace-temps dérivé ne corresponde pas à des entités « contiguës » dans la structure fondamentale (cf. Huggett et Wüthrich, 2013, 279). Pour l'exprimer de façon plus imagée, deux choses localisées côte à côte dans notre espace, ne sont pas nécessairement « localisées » côte à côte dans la structure fondamentale (la dernière occurrence de « localisées » est en guillemet car cette localisation se fait dans une structure différente de la structure spatiale). Enfin, notons qu'afin d'intégrer l'une des possibles leçons de la physique quantique, à savoir le caractère indéterministe de la nature, qui obéirait à des lois probabilistes, les quantas de la structure fondamentale sont supposés être liés par des relations probabilistes objectives, héritant de la physique quantique la difficulté à saisir de quelle manière il faut interpréter

¹⁰ « What is believed to correspond to three-dimensional spatial structures are so-called 'spin networks'. Spin networks can be thought of as networks of interwoven loops with 'spin' representations sitting on both the network's nodes and its edges. These spin representations quantify the discretely valued quantum 'volume' to which the node corresponds, and the discretely valued quantum 'area' of the edge corresponding to the surface of adjacency of the connected 'volumes'. Although the dynamics of the theory is far from settled, the general scheme evolves these spin network states by having an appropriate Hamiltonian operator acting on them. In general terms, the action of the Hamiltonian on a node of the spin network will either be identity, i.e., the node simply persists through 'time', or it splits the node into several nodes, or it fuses the node and some other nodes into a single node. The resulting structure is taken to be the quantum analogue of a four-dimensional spacetime and is called 'spin foam' ».

ces probabilités.

La morale à tirer est ici la même que pour la théorie des cordes : on peut débattre de la pertinence de référer à la structure fondamentale comme à un « espace ». De part sa nature probabiliste, ses déviations géométriques par rapport à l'espace-temps relativiste, et son caractère discret, se pose à nouveau la question de la relation entre la structure fondamentale décrite par la gravitation quantique à boucles et l'espace-temps relativiste. Ainsi, il est clair que même si la structure fondamentale est un espace, cet espace n'est pas *notre* espace : les deux structures sont distinctes. La question de savoir si la structure à partir de laquelle émerge l'espace-temps relativiste est un espace ou non demeure distincte du problème de l'émergence de l'espace-temps¹¹.

En résumé, dans le cadre de la gravité quantique à boucles, une approximation de l'espace-temps tel que décrit par la relativité générale, émerge d'une manière ou d'une autre d'une structure plus fondamentale faite d'entités discrètes, et dont la structure ne reflète pas nécessairement celle de l'espace-temps dans lequel nous vivons.

IV

Il est possible de scinder les difficultés propres à l'émergence de l'espace-temps en deux catégories, en établissant une analogie avec une distinction entre deux problèmes en philosophie de l'esprit : le *problème facile de la conscience* et le *problème difficile de la conscience* (cf. Chalmers 1995, 1996 tr. fr. 2010). Le problème facile de la conscience consiste à trouver des conditions suffisantes à l'existence des états mentaux, formulées en des termes scientifiques. Pour le dire autrement, le projet consiste à décrire les corrélations systématiques entre les états mentaux et des phénomènes physiques, en utilisant nos meilleurs modèles scientifiques en physique, en neurobiologie et dans les sciences cognitives. Le but est ainsi de déterminer quelles propriétés physiques ou biologiques déclenchent les états mentaux. Par exemple, existe-t-il un état biologique correspondant à la douleur en général ? Et pouvons-nous détecter votre douleur au bras simplement en examinant un scanner de votre cerveau ? Le problème facile n'est pas réellement « facile » bien entendu, mais nous pouvons au moins voir comment nous allons le résoudre, et nous avons déjà fait de grandes avancées dans la réalisation de ces cartographies du cerveau. Le problème difficile de la conscience, au contraire, s'intéresse à l'image ontologique correcte pour interpréter la relation de la conscience avec le monde physique. Quelle est la source de ces corrélations entre le mental et le physique ? Observons-nous ces corrélations parce que le mental est *identique* à des phénomènes physiques (approche réductionniste) ? Ou avons-nous affaire à des substances ou des propriétés *distinctes*, connectées par une relation qu'il reste à définir (approche dualiste) ? Ou encore, est-ce que ces corrélations apparentes signifient que la conscience est une pure illusion, qu'elle n'est pas réelle (approche éliminativiste) ? Le fossé explicatif entre deux mondes terminologiques, le monde du mental et le monde du physique, semble ainsi nous entraîner dans un mystère : quel est le lien entre ces deux mondes sémantiques ? Le problème est dit « difficile » car il semble que la science ne pourra pas nous aider à le résoudre¹².

¹¹ Un autre problème est le *problème de la mesure*, qui est également au cœur de la physique quantique pré-gravité quantique. A l'heure actuelle, il est difficile de savoir si le concept de superposition quantique est un problème indépendant du problème de l'émergence de l'espace-temps, ou si le concept de superposition quantique devra jouer un rôle dans la résolution du problème de l'émergence de l'espace-temps.

¹² Une autre approche populaire en philosophie de l'esprit est le physicalisme non-réductionniste fonctionnaliste. D'après cette approche, les états mentaux sont identifiés à des rôles causaux ou fonctionnels joués par des entités physiques. Je ne discuterai pas cette approche, en faisant remarquer qu'en ce qui concerne le problème difficile de la conscience, le physicalisme non-réductionniste s'effondre ou bien en un réductionnisme, ou bien en un dualisme, suivant l'interprétation ontologique donnée aux rôles causaux ou fonctionnels. Si ces rôles sont numériquement distincts de toute collection d'entités physiques composant le système examiné, alors on bascule dans un *fonctionnalisme ontologique* qui est un type particulier de dualisme des propriétés. Si les rôles peuvent être identifiés avec des collections d'entités physiques, alors nous obtenons un *fonctionnalisme sémantique* qui est un

Comparons ces deux problèmes faciles et difficiles avec l'idée d'un espace-temps émergent. Si la future théorie de la gravité quantique se révèle être l'une de celles qui soutiennent que l'espace-temps n'est pas fondamentalement réel, comment allons-nous concevoir la connexion entre le spatio-temporel et le non spatio-temporel ? Je propose ici de distinguer deux problèmes : le *problème facile de l'espace-temps* et le *problème difficile de l'espace-temps*. Le problème facile vise à trouver les conditions non-spatio-temporelles corrélées à l'existence des systèmes physiques spatio-temporels, et à l'existence de l'espace-temps dans son entièreté. En d'autres termes, le défi posé par le problème facile est de *dériver* les théories spatio-temporelles les plus fondamentales que nous avons à l'heure actuelle (la relativité générale et le modèle standard des particules) à partir d'une théorie de la gravité quantique. Cette dérivation devra prendre une forme logique précise en utilisant des outils mathématiques et des « principes ponts » pour connecter les notions primitives des théories dérivées aux notions primitives de la théorie fondamentale. Ce problème n'est pas « facile », contrairement à son nom. En fait, il est lové au centre de la gravité quantique : comment allons-nous retrouver l'espace-temps relativiste et les effets quantiques, au moins en tant qu'approximations décentes, à partir d'une théorie de la gravité quantique ?

Toutefois, de même qu'en philosophie de l'esprit, le problème est « facile » en ce sens que nous avons de très bonnes raisons d'avoir confiance dans le travail des physiciens, des mathématiciens et des logiciens : ceux-ci parviendront vraisemblablement à fournir de telles dérivations. En revanche, en ce qui concerne le problème difficile, il en va autrement. Le problème difficile de l'espace-temps est d'interpréter le fossé explicatif existant apparemment entre la structure fondamentale non-spatio-temporelle et la structure dérivée spatio-temporelle. Comment allons-nous interpréter ce fossé au niveau ontologique ? Le vocabulaire spatio-temporel (ou disons, la conjonction du vocabulaire spatial et temporel) s'enracine profondément dans notre manière de conceptualiser la réalité et, dès lors, la manière dont nous allons devoir envisager l'espace, le temps et l'espace-temps, en admettant que ceux-ci ne sont pas fondamentalement réel, ne va pas de soi.

Notons que cette analogie peut être étendue à de nombreux problèmes philosophiques. Lorsque nous sommes confronté à deux types de phénomènes qui covarient de façon systématique, la question de la relation entre ces phénomènes émerge naturellement. On peut songer à la philosophie de l'esprit, à laquelle je viens de faire référence, mais aussi à d'autres exemples, comme la *composition*. Si un objet est composé d'atomes, le comportement de l'objet et le comportement des atomes qui le constituent entretiendront une relation privilégiée. Pourtant, il semble qu'un objet matériel ne soit pas totalement réductible aux entités qui le composent, au moins si l'on en croit une analyse sommaire du sens commun. En effet, une statue peut tout à fait survivre à la perte de l'un de ses bras ou de l'une de ses jambes, alors que la collection d'atomes *avant* la perte du membre, et la collection d'atomes *après* la perte du membre, seront numériquement distinctes. La collection d'atomes ne peut donc pas survivre à la perte d'un atome, et a fortiori, d'une sous-collection d'atomes qui compose partiellement cette collection. On peut ainsi interpréter le sens commun comme attribuant des propriétés modales distinctes à la collection des parties de la statue, et à la statue elle-même. Certains en tirent une conclusion dualiste : la statue est distincte de ses parties. D'autres au contraire, en affirmant que la statue est identique à ses parties, soutiennent que nous n'avons affaire qu'à un seul et objet et souhaitent réduire la statue à ses parties, en adoptant ainsi une position réductionniste. D'autres encore souscrivent à une approche éliminativiste, et soutiennent que la statue n'existe pas, et qu'il existe uniquement d'autres entités, par exemple des entités plus petites qui composent la statue¹³.

V

type particulier d'approche réductionniste. Pour une introduction à la philosophie de l'esprit, voir par exemple Kim (2008).

¹³ Voir van Inwagen (1990), Merricks (2001), Benovsky (2015), Le Bihan (2013, 2015a, 2016).

De même qu'il existe trois grandes approches pour concevoir la corrélation systématique entre des états mentaux et des états physiques, ou entre des objets matériels et les entités qui la constituent, si nous parvenons à dériver nos théories actuellement jugées les plus fondamentales à partir d'une théorie de la gravité quantique, il restera à proposer une thèse à propos de la relation entre les entités spatio-temporelles, et les entités non-spatio-temporelles. Ici, on l'a vu précédemment, il existe trois grandes options : le dualisme, l'éliminativisme et le réductionnisme.

D'après le dualisme, les entités non-spatio-temporelles et les entités spatio-temporelles existent bel et bien, bien que les entités spatio-temporelles ne soient pas fondamentales, en « émergeant » d'entités non-spatio-temporelles. Cette approche requiert de faire appel à des relations de fondations (*grounding relations*) ou à d'autres relations de construction (*building relations*) pour connecter ces deux classes d'entités. Bien que beaucoup d'encre coule actuellement sur ces relations, le camp des philosophes naturalistes auquel j'appartiens juge cependant d'un œil sceptique l'ensemble de ces discussions techniques, assez peu motivées à mon sens par d'authentiques problèmes philosophiques. Quoi qu'il en soit, le défenseur du dualisme devra admettre l'existence d'une relation ontologique quelconque et admettre que son interprétation possède un certain coût : il devra en effet postuler *différents types d'entités* (les entités fondamentales et les entités non-fondamentales), *plusieurs niveaux ontologiques* auxquels résident ces entités, et une relation de fondement, ou une autre relation, peut-être *sui generis*, connectant ces entités.

D'après l'éliminativisme, les entités spatio-temporelles n'existent tout simplement pas. Ce sont des illusions, et là où nous croyons qu'il existe des choses localisées dans l'espace et dans le temps, il y a en fait *autre chose*, d'autres choses qui n'existent ni dans le temps si dans l'espace. La stratégie éliminativiste est bien connue en philosophie de l'esprit et en métaphysique des objets matériels. Disons simplement que l'objection habituelle est d'affirmer qu'il est évident que les états mentaux existent, ou qu'il est évident que les objets matériels existent. Toutefois, ce serait manquer l'idée somme toute attrayante, de l'éliminativisme : la stratégie éliminativiste, lorsqu'elle vise à soutenir que x n'existe pas, n'implique aucunement qu'il n'y a pas quelque chose d'autre à la place de x . Par exemple, en philosophie de l'esprit, lorsqu'un éliminativiste soutient que la douleur n'existe pas, il accepte en revanche qu'il existe bel et bien des états physiques que nous catégorisons erronément comme étant des états mentaux. Et l'éliminativiste à propos des objets matériels comme les tables et les chaises ne soutient pas qu'il n'existe absolument rien là où nous croyons qu'il existe des tables et des chaises. Il soutient qu'il existe autre chose, et que nous faisons une erreur de catégorie en appréhendant ces entités comme étant des objets matériels.

La stratégie sera la même dans le cadre d'une ontologie non-spatio-temporelle. Ce que nous prenons pour l'espace et pour le temps du fait de nos perceptions, ou pour l'espace-temps relativiste du fait de la relativité générale, sont en fait d'autres entités, très différentes des catégories spatiales, temporelles ou spatio-temporelles. En un sens, l'éliminativiste considèrera qu'avec la résolution du problème facile, en retrouvant les approximations qui correspondent à nos théories actuelles, on ne doit pas souscrire à l'existence des entités postulées par nos théories dérivées actuelles. Au contraire, on gagnera une meilleure compréhension de la nature du processus d'approximation en examinant les différences entre les notions primitives utilisées dans les théories actuelles et la future théorie de la gravité quantique. Cette approche éliminativiste a le mérite de l'économie théorique. En effet, contrairement à l'approche dualiste, elle évite de postuler des *entités de deux types* (fondamentales et dérivées), de postuler des *niveaux ontologiques*, et de postuler une *relation de connexion* entre les deux types d'entités. Toutefois, l'approche est très radicale, probablement encore plus que le rejet des états mentaux ou des objets matériels. Peut-on vraiment accepter l'inexistence de l'espace et du temps, pour profiter des paysages théoriques désertiques qui structurent l'univers mental de l'éliminativiste ? Peut-être, mais il faut alors fournir une explication complexe pour rendre compte de notre phénoménologie de l'espace et du temps.

La troisième grande option, que j'examine plus en détails dans un essai en cours

d'évaluation, est une approche réductionniste qui soutient que l'espace-temps et les relations spatio-temporelles existent bel et bien en étant identiques à des collections d'entités non-spatio-temporelles. Les entités non-spatio-temporelles seraient ainsi des composantes des relations spatio-temporelles, ces dernières composant elles-mêmes l'espace-temps dans sa globalité. *Dans l'approche réductionniste présentée, il y a identité entre une somme S d'entités fondamentales (x,y,z) et une entité dérivée $R : S(x,y,z)=R$. Toutefois, il n'y a pas d'identité entre la conjonction de x, y, z (la classe distributive dans la terminologie de Leśniewski, cf. 1992) et la somme $S(x,y,z)$ (la classe collective dans la terminologie du même logicien) : $\{x,y,z\} \neq S(x,y,z)$. Ainsi, le fossé explicatif est porté par la différence entre une pluralité de parties non-spatio-temporelles et la somme de ces entités.* Une objection immédiate est que la composition requiert l'espace en amont, et qu'il est difficile de saisir comment une relation spatiale pourrait être composée de parties non-spatiales. Cependant, il est possible de souscrire, à la suite de L. A. Paul (2002, 2012), à une notion de *composition méréologique logique*. Une entité appartenant à une catégorie ontologique particulière peut être « logiquement composée » d'entités appartenant à d'autres catégories ontologiques. Le terme « logique » ne doit pas nous induire en erreur ici : il ne s'agit pas d'affirmer que ces parties sont logiques en étant « dans la tête », ou en étant des entités abstraites à partir du monde concret. L'idée est que l'articulation même de la réalité objective, ses lignes de découpe, ne sont pas spatiales ou spatio-temporelles. Les ingrédients se combinent de manières diverses, et l'espace et le temps ne constituent pas un arrière-plan indépendant sur lequel ces ingrédients viennent se combiner. Au contraire, les entités spatio-temporelles sont déjà le résultat de combinaisons d'entités non-spatio-temporelles. L.A. Paul décrit en particulier des objets ayant leurs propriétés pour parties. Une chaise serait ainsi composée de sa couleur et de sa forme par exemple, et de toutes ses autres propriétés. Cette théorie méréologique du faisceau (les objets sont identiques à des agrégats, à des faisceaux de propriétés) requiert cette notion de composition logique, mais on peut tout à fait souscrire à cette notion de composition logique *sans recourir à la théorie méréologique du faisceau de L.A. Paul*¹⁴. La dérivation de théories spatio-temporelles dérivées (comme la relativité générale) à partir d'une théorie de la gravité quantique fondamentale signifierait alors, non pas qu'il existe des entités dérivées comme les relations spatio-temporelles (approche dualiste), ou que ces relations spatio-temporelles sont des approximations, des catégorisations approximatives d'autre chose (approche éliminativiste). D'après l'approche réductionniste, les relations spatio-temporelles existent bel et bien, en étant identiques à des collections d'entités non-spatio-temporelles. Et ces relations spatio-temporelles, bien qu'elles soient composées d'entités non-spatio-temporelles, ne sont pas moins fondamentales que les entités qui les composent¹⁵.

Un lecteur attentif objectera peut-être qu'on a simplement résolu le problème en forgeant une notion primitive qui permet de passer du non-spatio-temporel au spatio-temporel, « à l'intérieur

¹⁴ Cf. Le Bihan (à paraître, manuscrit).

¹⁵ En fait, on peut distinguer au moins deux grandes notions de fondamentalité, la *fondamentalité méréologique* et la *fondamentalité par la priorité logique*. Celles-ci sont souvent identifiées en philosophie de la physique, mais elles sont soigneusement distinguées en métaphysique analytique contemporaine. La fondamentalité méréologique n'est autre que la relation de partie à tout. En un sens, les parties sont plus fondamentales que le tout, *par définition*. La fondamentalité de la priorité logique désigne l'antécédence logique ou métaphysique, c'est-à-dire ce qui vient en premier dans l'explication, ou le principe métaphysique qui fonde cette antériorité explicative. En général, les deux notions sont confondues, notamment en physique, car les parties sont jugées plus fondamentales que les tous qu'elles composent de façon non triviale : pour expliquer les propriétés du tout, on regarde les propriétés des parties. Cependant, certains auteurs comme Schaffer défendent que les tous sont plus fondamentaux que les parties qui les composent (Schaffer 2009, 2010). Avec le phénomène d'intrication quantique, on a, potentiellement, un tel exemple de système plus fondamental que ses parties : le tout est logiquement prioritaire, car il est impossible de dériver les propriétés du tout en examinant les propriétés des parties, ainsi que le montre le principe de non-localité mis en lumière par les inégalités de Bell (cf. par exemple Ismael et Schaffer 2016). Ici, il ne s'agit pas de nier le caractère plus fondamental de l'ontologie décrite par la gravité quantique, au sens de la fondamentalité méréologique. Ce qui est rejeté est le fait que l'espace-temps serait moins fondamental que la structure qui le compose, au sens de la priorité logique (c'est-à-dire de l'antériorité ontologique).

même » des entités spatio-temporelles. Cependant, toute théorie philosophique requiert de faire appel des entités ou notions primitives, qui se comprennent par le travail explicatif qu'elles assurent, et non par leur définition explicite (cf. Benovsky 2013). Toute théorie possède de telles notions primitives. Avec la relation de composition logique, il devient possible de formuler une approche réduisant le spatio-temporel à du non-spatio-temporel, sans pour autant remettre en cause l'existence des entités spatio-temporelles, comme le fait l'éliminativisme.

VI

En l'état, il est impossible de déterminer quel programme de recherche en gravité quantique a le plus de chances d'être couronné de succès et, donc, quelle image de la réalité nous offrira la physique dans les décennies à venir. Néanmoins, il semble que la place prépondérante que nous accordons à l'espace et au temps devra être réévaluée et que nous devons revoir l'utilisation du critère de la spatio-temporalité dans la définition de ce que c'est que d'être matériel, avec toutes les conséquences que cela entraîne à l'égard des débats sur la nature des entités abstraites comme les nombres, et des entités mentales.

Au delà du problème technique de la dérivation de la relativité générale et des théories quantiques des champs à partir de la future théorie de la gravité quantique, il restera un problème à résoudre, à savoir la compréhension de l'ontologie, de la structure de réalité, qui permet une telle dérivation. La dénomination du problème « facile » de l'espace-temps pour désigner ce problème doit se comprendre avec humour, dans la mesure où la formulation d'une théorie de la gravité quantique est l'une des tâches les plus ardues jamais rencontrées par les scientifiques et les philosophes. Ce terme signifie simplement que l'on sait où chercher, dans quelles directions, et que l'on a bon espoir de résoudre le problème. Au contraire, il semble que la physique ne pourra pas répondre au problème difficile de l'espace-temps, de la même manière que la neurobiologie ou la psychologie cognitive ne peuvent pas répondre au problème difficile de la conscience. A mon sens, il en va de l'émergence de l'espace-temps comme il en va du problème difficile de la conscience : l'éliminativisme et le réductionnisme sont des stratégies bien plus prometteuses que le dualisme, en évitant de surcharger notre boîte à outils ontologique¹⁶.

¹⁶ Pour leurs commentaires à propos une version antérieure de cet essai, je tiens à remercier Jiri Benovsky, Nick Huggett, Niels Linnemann, Christian Wüthrich ainsi que deux évaluateurs anonymes.

Références :

- Baker, David John. 2016. « Does String Theory Posit Extended Simples? ». *Philosophers' Imprint* 16.
- Benovsky, Jiri. 2013. « Philosophical Theories, Aesthetic Value, and Theory Choice ». *Journal of Value Inquiry* 47 (3) : 191–205.
- . 2015. « From Experience to Metaphysics: On Experience-Based Intuitions and Their Role in Metaphysics ». *Noûs* 49 (4) : 684–97.
- Bojowald, Martin, & Suddhasattwa Brahma. 2017. « Signature Change in Loop Quantum Gravity: General Midisuperspace Models and Dilaton Gravity. » *Physical Review D* 95 (12). doi:10.1103/PhysRevD.95.124014.
- Braddon-Mitchell, David, and Kristie Miller. 2006. « The Physics of Extended Simples ». *Analysis* 66 (3): 222–226.
- Brahma, Suddhasattwa. 2017. « Emergence of Time in Loop Quantum Gravity ». <http://philsci-archive.pitt.edu/13158/>.
- Brandenberger, Robert, & Vafa, Cumrun (1989). « Superstrings in the Early Universe ». *Nuclear Physics B*, 316, 391–410.
- Callender, Craig. 2011. « Philosophy of Science and Metaphysics ». In *The Continuum Companion to the Philosophy of Science*, S. French & J. Saats, 33–54. Bloomsbury Academic.
- Chalmers, David J. 1995. « Facing Up to the Problem of Consciousness ». *Journal of Consciousness Studies* 2 (3) : 200–19.
- . 1996. *The Conscious Mind : In Search of a Fundamental Theory*. Oxford University Press.
- . 2010. *L'Esprit conscient*. Paris : Les Éditions d'Ithaque.
- Greene, Brian. 1999. *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. New York: Random House.
- . 2000. *L'Univers Élégant*. Paris : Gallimard. Tr. fr. par Céline Laroche.
- Haro, Sebastian de. 2017. « Dualities and Emergent Gravity: Gauge/Gravity Duality ». *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 59 : 109–125.
- Huggett, Nick. 2017. « Target Space \neq Space ». *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 59 : 81–88.
- Huggett, Nick, Tiziana Vistarini, et Christian Wüthrich. 2013. « Time in Quantum Gravity ». In *A Companion to the Philosophy of Time*, Wiley-Blackwell, 242–61. Adrian Bardon and Heather Dyke (éd.).
- Huggett, Nick, et Christian Wüthrich. 2013. « Emergent Spacetime and Empirical (In)Coherence ». *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 44 (3) : 276–285.
- Inwagen, Peter van. 1990. *Material Beings*. Cornell University Press.
- Ismael, Jenann, et Jonathan Schaffer. 2016. « Quantum Holism: Nonseparability as Common Ground ». *Synthese*, 1–30. doi:10.1007/s11229-016-1201-2.
- Kiefer, C. 2011. « Time in Quantum Gravity ». In *The Oxford Handbook of Philosophy of Time*, édité par Craig Callender, 667. Oxford University Press.
- Kim, Jaegwon. 2008. *Philosophie de l'esprit*. Paris : Ithaque.
- Kuhlmann, Meinard. 2015. « Quantum Field Theory ». Édité par Edward N. Zalta. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <https://plato.stanford.edu/archives/sum2015/entries/quantum-field-theory/>.
- Lachièze-Rey, Marc. 2008. *Au-delà de l'espace et du temps : la nouvelle physique*. Le Pommier. Paris. <https://www.editions-lepommier.fr/au-dela-de-lespace-et-du-temps>.
- Leśniewski, Stanisław, 1992. *Stanisław Leśniewski: Collected Works*. Kluwer Academic

Publishers.

- Le Bihan, Baptiste. 2013. « Why a Gunk World Is Compatible with Nihilism About Objects ». *Studia Philosophica Estonica* 6 (1):1–14.
- . 2015b. « The Unrealities of Time ». *Dialogue* 54 (1) : 25-44.
- . 2015a. « No Physical Particles For a Dispositional Monist? ». *Philosophical Papers* 44 (2) : 207-232.
- . 2016. « Super-Relationism : Combining Eliminativism about Objects and Relationism about Spacetime ». *Philosophical Studies* 173 (8) : 2152-2178.
- . A paraître. « Les théories méreologiques du faisceau ». In *Le Renouveau de La Métaphysique, Autour de Frédéric Nef*, Vrin.
- . Manuscrit. « How To Travel Light Into The Non-Spatial: Space Emergence in an Ontological Flat World ».
- Matsubara, Keizo. 2013. « Realism, Underdetermination and String Theory Dualities ». *Synthese* 190 (3) : 471–489.
- . 2017. « Quantum Gravity and the Nature of Space and Time ». *Philosophy Compass* 12 (3).
- McDaniel, Kris. 2007. « Extended Simples ». *Philosophical Studies* 133 (1): 131–141.
- McLaughlin, Brian P. 1992. « The Rise and Fall of British Emergentism ». In *Emergence or Reduction?: Prospects for Nonreductive Physicalism*, édité par Ansgar Beckermann, Hans Flohr, et Jaegwon Kim. De Gruyter.
- Merricks, Trenton. 2001. *Objects and Persons*. Vol. 67. 3. Oxford University Press.
- Oriti, Daniele. 2016. « Group Field Theory as the Second Quantization of Loop Quantum Gravity ». *Classical and Quantum Gravity* 33 (8).
- Paul, L. A. 2002. « Logical Parts ». *Noûs* 36 (4) : 578–596.
- . 2012. « Building the World From its Fundamental Constituents ». *Philosophical Studies* 158 (2) : 221–256.
- Read, James. 2016. « The Interpretation of String-Theoretic Dualities ». *Foundations of Physics* 46 (2) : 209–235.
- Rovelli, Carlo. 2004. *Quantum Gravity*. Cambridge University Press.
- . 2015. *Par delà le visible : La réalité du monde physique et la gravité quantique*. Paris: Odile Jacob.
- Saint-Ours, Alexis de. 2011. « La disparition du temps en gravitation quantique ». *Philosophia Scientiæ. Travaux d'histoire et de philosophie des sciences*, n° 15-3 (octobre) : 177-96.
- Schaffer, Jonathan. 2009. « Spacetime the One Substance ». *Philosophical Studies* 145 (1) : 131–148.
- . 2010. « Monism: The Priority of the Whole ». *Philosophical Review* 119 (1) : 31–76.
- Simons, Peter. 2004. « Extended Simples ». *The Monist* 87 (3): 371–85.
- Wilson, Jessica M. 2015. « Metaphysical Emergence: Weak and Strong ». In *Metaphysics in Contemporary Physics*, édité par Tomasz Bigaj et Christian Wüthrich, 251–306. Poznan Studies in the Philosophy of the Sciences and the Humanities.
- Witten, Edward. 1996. « Reflections on the Fate of Spacetime », *Physics Today*, 49 (4).
- Wüthrich, Christian. 2013. « A la recherche de l'espace-temps perdu : questions philosophiques concernant la gravité quantique ». In *Précis de philosophie de la physique*, Vuibert. Soazig Le Bihan (éd.).