

Philosophie et gravité quantique

Baptiste Le Bihan

Paru dans *La recherche* numéro 566 de Juillet-Septembre 2021, pp 24-28.

L'espace-temps existe-t-il ? Le cas échéant de quoi est-il constitué ? Et s'il n'existe pas, pourquoi la physique décrit-elle si bien notre monde à l'aide de ce concept ? Pour répondre à ces questions, une stratégie consiste à examiner nos meilleures théories physiques empiriquement confirmées comme le modèle standard de la physique des particules et, plus particulièrement, la relativité générale. En effet, la relativité générale délivre un message précis sur la nature de l'espace et du temps. Et c'est elle qui requiert de remplacer nos concepts intuitifs d'espace et de temps par un concept commun d'espace-temps courbe, les durées, les distances et la force de gravitation s'expliquant alors comme des propriétés géométriques de cet espace-temps. On pourrait donc, au premier abord, vouloir se tourner vers la relativité générale pour déterminer si l'espace-temps existe réellement, et examiner sa nature.

Toutefois, la relativité générale et le modèle standard de la physique des particules ne font pas bon ménage et les physiciens sont attelés au développement d'une théorie physique plus fondamentale qui devrait avoir d'importantes répercussions sur notre compréhension de la nature de l'espace-temps. Ainsi, un autre angle d'approche pour répondre à nos questions, consiste à examiner les approches plus spéculatives qui visent à dépasser les faiblesses de ces cadres théoriques, et en particulier leur difficile compatibilité. Ces approches en construction, qui répondent collectivement au nom de « gravité quantique » incluent par exemple la *théorie des cordes*, la *gravité quantique à boucles* ou la *théorie des ensembles causaux*, pour n'en citer que quelques unes. Ces approches tentent de décrire les phénomènes à la fois quantique et gravitationnels ; c'est par exemple le cas du centre des trous noirs, mais aussi de l'espace-temps lui-même.

La physique est ainsi un tout constitué de multiples sous-communautés. Il est utile de garder en particulier à l'esprit l'existence de deux parties de la physique : la *physique empiriquement confirmée*, incluant la relativité et la physique des particules, d'une part, et la *physique spéculative de la gravité quantique*, d'autre part. Ces deux sous-communautés constituent deux types de physique très

différents. En utilisant la célèbre distinction de l'historien et philosophe des sciences Thomas Kuhn entre *science paradigmatique* et *science révolutionnaire*, on peut décrire la situation actuelle comme la co-habitation d'une science paradigmatique attachée à développer les résultats d'un paradigme qui a fait ses preuves (un paradigme peut s'appréhender en première approche comme une manière de voir le monde physique, une sorte de monde intellectuel comme le paradigme newtonien, ou le paradigme de la chimie moderne), et d'une science révolutionnaire qui s'attache à la recherche d'un cadre explicatif plus fondamental. Dans le cas de la physique fondamentale, cette science révolutionnaire n'est autre que la gravité quantique telle que définie ci-dessus.

Le domaine de la gravité quantique est lui aussi morcelé, comme on l'a vu, car il existe de multiples directions possibles à explorer pour faire avancer la physique fondamentale, avec différents enseignements sur la nature de l'espace-temps, et il est bien sûr impossible de savoir quelle approche se révélera fructueuse. Face à cette situation compliquée, les philosophes peuvent s'avérer utiles. On peut citer deux grands types de difficultés propres à la physique fondamentale qui soulignent le caractère potentiellement fructueux d'un travail collaboratif entre philosophes et physiciens dans un tel contexte.

Un premier type de difficultés est *méthodologique* : quels sont les principes méthodologiques qui doivent guider le développement de la physique ? Par exemple, une théorie physique fondamentale doit-elle être valide à toutes les échelles d'énergie, ou peut-elle se restreindre à certains domaines de description ? Un deuxième type de difficultés est *ontologique* et porte sur l'ontologie des théories, ou formalismes mathématiques développés. L'ontologie est le nom savant qui réfère à ce qui *est*, ce qui *existe*. Dans ce contexte, il s'agit de savoir comment est le monde, ce qui le constitue, si la théorie ou le formalisme mathématique considéré décrit adéquatement la réalité. Or, les approches de la gravité quantique n'admettent pas toujours une ontologie claire. C'est par exemple le cas lorsque ces dernières semblent nier l'existence de l'espace, du temps ou de l'espace-temps.

Qu'il s'agisse des problèmes méthodologiques ou ontologiques, les philosophes peuvent s'avérer utiles car ils ont une expertise dans l'évaluation des principes méthodologiques d'une part, et dans l'analyse et la production des concepts, d'autre part. D'où l'utilité de mettre en place une nouvelle communauté dans le milieu de la recherche, spécialisée dans les discussions philosophiques de thèmes et d'aspects de la gravité quantique : la *philosophie de la gravité quantique*. Cette mise en place est à l'œuvre à l'aide de plusieurs projets menés à l'Université de Genève, et au sein de la University

of Illinois at Chicago, les projets *Beyond spacetime* et *Composing the world out of nowhere*. Ces projets philosophiques impliquent des philosophes et des physiciens et ont donné lieu à plusieurs résultats (voir les deux ouvrages collectifs dans les références ainsi que les enregistrements des conférences données accessibles sur Youtube : <https://www.youtube.com/watch?v=3HcEjxbSzJE&t=3413s>).

Que sont ces résultats, et que nous nous disent donc ces différentes approches de la gravité quantique de l'existence et de la nature de l'espace-temps ? Avant de nous tourner vers la gravité quantique, il est utile d'examiner d'abord la description donnée par la relativité générale de l'espace-temps pour pouvoir ensuite nuancer cette caractérisation à l'aune de celles offertes par la gravité quantique.

La relativité, que ce soit dans sa version restreinte ou générale, suggère que nous vivons dans un espace-temps plus fondamental que l'espace et que le temps, usuellement appréhendés comme des dimensions distinctes. Ainsi, notre monde n'est pas un système d'objets matériels localisés dans l'espace, et évoluant dans le temps. Et le temps n'est pas un paramètre universel externe au monde, et permettant d'enregistrer son évolution. Le temps, tout autant que l'espace, est une dimension structurante, interne, du monde physique.

Les conséquences philosophiques sont nombreuses. Une première conséquence est l'*éternalisme* - ce que nous appréhendons comme le passé, le présent et le futur co-existent de la même manière que les choses localisées en différents lieux co-existent. Pour comprendre cette idée, songez à l'espace et la manière qu'ont les choses d'exister dans l'espace. Il est naturel d'envisager que les endroits autres que celui où nous nous trouvons actuellement existent au même titre que ce dernier. Par exemple, ce n'est pas parce que vous trouvez actuellement à votre domicile, que votre lieu de travail, ou la ville de Sydney, n'existent pas. Leur existence en d'autres lieux au sein de la dimension spatiale ne rend pas ces endroits moins réels. En remplaçant la notion d'espace par la notion d'espace-temps, il devient naturel d'appliquer le même raisonnement au temps, ou plus exactement, à l'espace-temps. Ainsi, l'extinction des dinosaures, ou votre anniversaire de l'année prochaine ont, dans cette approche, une même réalité. La deuxième conséquence est une *thèse du non-écoulement du temps*, l'écoulement n'étant qu'un artefact de notre façon d'être situé dans le temps, sans avoir de contrôle sur notre localisation en son sein. Ces deux thèses constituent la thèse de l'univers-bloc. Ce modèle de l'univers-bloc ne doit pas être interprété littéralement cependant. Il ne s'agit pas de soutenir que le monde physique possède la forme d'un cube. Cette comparaison avec un cube est seulement là

pour souligner l'épaisseur temporelle du monde physique : de la même manière que le monde possède trois dimensions spatiales, que l'on peut représenter par un cube pour illustrer ces trois dimensions par la largeur, hauteur et profondeur d'un objet – le cube –, dans cette représentation on représente les trois dimensions spatiales à l'aide de deux dimensions spatiales seulement – la largeur et la profondeur du cube – et la dimension temporelle par la hauteur du cube. Ainsi la théorie de l'univers-bloc prend au sérieux la notion d'espace-temps, sans prendre partie sur la forme même de la réalité physique, sur des questions du caractère fini ou infini de l'espace-temps.

Toutefois, cette approche « réaliste » de l'espace-temps, suggérée par la physique relativiste semble elle-même menacée par la physique théorique de demain. Et, fait intéressant, il ne s'agit pas de revenir en arrière vers une approche plus intuitive postulant l'existence séparée de l'espace et du temps, mais d'aller encore plus loin dans le rejet de nos intuitions pré-théoriques à propos de la nature de l'espace et du temps en soutenant que le bloc espace-temps lui-même pourrait être une illusion, ou une structure émergeant à un certain niveau de description. Pour le comprendre, examinons certains aspects des deux approches les plus populaires (en nombre de physiciens travaillent au sein de ces programmes de recherche) : la théorie des cordes et la gravité quantique à boucles.

Il existe en fait plusieurs théories des cordes et celles-ci ont conjecturées comme étant des approximations d'une théorie plus fondamentale : la *théorie M*. Ces théories des cordes possèdent dix dimensions, et la théorie M onze dimensions, ce qui signifie qu'existe en plus de l'espace-temps à quatre dimensions, d'après ces théories, six ou sept autres dimensions exotiques que l'on ne peut pas imaginer par des images mentales, mais simplement appréhender à travers des descriptions mathématiques. Pour en revenir à notre fameux bloc, il semble que notre imagination soit mal équipée pour saisir cette idée de dimension supplémentaires. S'il était déjà difficile de se représenter le temps comme une dimension, avec l'idée de nombreuses dimensions spatiales supplémentaires et invisibles, la difficulté monte d'un cran. Ces dimensions supplémentaires, dans nos descriptions mathématiques, peuvent avoir des caractéristiques variées, notamment en étant enroulées sur elles-mêmes de diverses manières. L'espoir au sein de la communauté cordiste est que l'un de ces espaces mathématiques se révélera être le « bon » modèle. Toutefois, si on pourrait être tentés de voir une simple redéfinition de la notion d'espace-temps en lui ajoutant des dimensions supplémentaires, certains résultats mathématiques interdisent une telle interprétation en soulignant que des espaces

aux formes très différentes mènent aux mêmes conséquences, suggérant ainsi que ces espace des cordes n'existent pas vraiment et constituent un artefact mathématique (Witten 1996).

Une seconde approche de la gravité quantique est la *gravité quantique à boucles*. Celle-ci appréhende la réalité comme une collection de nœuds et de liens entre ces nœuds qui ne sont pas dans l'espace, mais constituent l'espace. Un point surprenant de cette approche est le phénomène de *localité désordonnée* (voir e.g. Huggett and Wüthrich 2013). Il s'agit d'une déviation entre les éléments tels qu'ils sont décrits par la gravité quantique à boucles, et la description de ces éléments dans la relativité générale. Prenons par exemple les villes de Paris et de Marseille. Il est évident que ces deux villes ne se touchent pas. Et pourtant, il arrive dans certains modèles de la gravité quantique à boucles que l'on ait des relations d'adjacence entre des éléments qui sont pourtant éloignés à notre échelle. Ainsi, il se pourrait très bien que certains éléments qui composent Paris et Marseille soient directement connectés (c'est-à-dire qu'ils soient adjacents) dans la description fondamentale du système physique que nous appelons « France ».

Comment réconcilier alors notre expérience ordinaire avec ces descriptions du monde si étrange ? Comment lier une journée ordinaire constituée d'épisodes s'enchaînant dans le temps, et se produisant dans l'espace, avec l'ontologie potentiellement sans durées et sans distances de la théorie des cordes, ou avec l'ontologie qui remet en cause l'ordre même des choses dans l'espace avec la gravité quantique à boucles ? A l'heure actuelle, il n'existe pas une seule réponse à cette question, universellement admise. On peut distinguer deux grands types d'approches. Ou bien l'espace-temps est une sorte d'illusion, une fiction produite par nos esprits qui se substitue à la réelle arène de la réalité, ou bien il existe bel et bien, mais pas à toutes les échelles de description, si bien que lorsqu'on commence à sonder des domaines d'énergie particulièrement élevés, ou à examiner certains phénomènes comme le centre des trous noirs, l'idée même d'un espace-temps cesse d'être pertinente. Quelle que soit la réponse à cette question, la physique du futur s'annonce passionnante pour notre compréhension de l'espace et du temps.

Références :

Huggett, Nick, Matsubara Keizo, Wüthrich, Christian, *Beyond Spacetime : The Foundations of Quantum Gravity*, Cambridge: Cambridge University Press.

Huggett, Nick et Christian Wüthrich, Emergent spacetime and empirical (in)coherence, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 44 (3):276-285.

Kuhn, Thomas, *La structure des révolutions scientifiques*. (1962, 1983 pour traduction française chez Flammarion).

Le Bihan, B. *Qu'est-ce que le temps ?*, Vrin, 2019 .

Witten, Edward. 1996. « Reflections on the Fate of Spacetime », *Physics Today*, 49 (4).

Wüthrich, Christian, Le Bihan, Baptiste et Huggett, Nick, *Philosophy Beyond Spacetime*, Oxford: Oxford University Press. A paraître. <https://global.oup.com/academic/product/philosophy-beyond-spacetime-9780198844143?cc=ch&lang=en&>