

Théorie des cordes, gravité quantique à boucles et éternalisme

Baptiste Le Bihan

A paraître dans *Métaphysique du temps* (dir. Alexandre Declos et Claudine Tiercelin), Paris : Collège de France.

Traduction par l'auteur de « String Theory, Loop Quantum Gravity and Eternalism » paru dans *The European Journal for Philosophy of Science* 10, 2020.

Résumé : L'éternalisme, la thèse selon laquelle les entités que nous catégorisons comme étant passées, présentes et futures existent tout autant, est la meilleure approche ontologique de l'existence temporelle qui soit en accord avec les théories de la relativité restreinte et de la relativité générale. Cependant, les théories de la relativité restreinte et générale ne sont pas fondamentales si bien que plusieurs programmes de recherche tentent de trouver une théorie plus fondamentale de la gravité quantique rassemblant tous les enseignements de la physique relativiste et de la physique quantique. Certaines de ces approches soutiennent que le temps n'est pas fondamental. Toutefois, si le temps n'est pas fondamental, quelles en sont les conséquences pour l'éternalisme et les débats sur l'existence dans le temps ? Premièrement, je soutiendrai que la non-fondamentalité du temps que l'on rencontre dans la théorie des cordes mène à l'éternalisme standard. Deuxièmement, je soutiendrai que la non-fondamentalité du temps rencontrée dans la gravité quantique à boucles implique l'éternalisme atemporel, à savoir une nouvelle position qui demeure fidèle à l'esprit de l'éternalisme standard.

1. Introduction

Plusieurs approches de la gravité quantique suggèrent que l'espace-temps (ou au moins certains de ses attributs centraux) n'est pas fondamental¹. L'expression « gravité quantique » désigne la collection des programmes de recherche qui visent à réconcilier la relativité générale avec la physique quantique, nos deux physiques empiriquement confirmées les plus fondamentales à l'heure

¹ Pour des références, voir par exemple Huggett et Wüthrich (2013), Matsubara (2017), Le Bihan et Linnemann (2019), Lam et Wüthrich (2018), Baron (2019) et Huggett et Wüthrich (à paraître).

actuelle. D'un côté, la relativité générale (désormais RG) est une théorie qui excelle à décrire la gravitation, en particulier aux grandes échelles. D'après l'interprétation standard de RG, la gravitation n'est pas une force mais la manifestation de la géométrie de l'espace-temps. Cependant, RG ne prend en pas compte les effets quantiques et ne peut pas être entièrement combinée à la théorie quantique des champs. D'un autre côté, la théorie quantique des champs excelle dans la description des effets quantiques et des forces fondamentales, en particulier aux très petites échelles. Cependant, elle n'offre pas de description de la gravitation. Par conséquent, nous manquons d'une théorie qui nous offre les ressources pour décrire les *phénomènes* qui font intervenir à la fois des effets gravitationnels et des effets quantiques~: les *trous noirs*, les *premiers instants* après le big bang et la *structure de l'espace-temps* elle-même².

Bien que ces programmes soient de nature très spéculative, ils sont riches de potentielles répercussions sur les débats classiques en métaphysique. Cet article examine les conséquences possibles de la non-fondamentalité de l'espace-temps, et en particulier du temps – que l'on rencontre dans certaines de ces approches – sur le débat à propos de l'*existence dans le temps*. L'*éternalisme* est la thèse selon laquelle les entités passées, présentes et futures existent *simpliciter*³, le *présentisme* la thèse que seules les entités présentes existent *simpliciter*, et le *non-futurisme*, la thèse que les entités passées et présentes existent *simpliciter*, contrairement aux entités futures. Je soutiendrai que la non-fondamentalité du temps, si elle devait être avérée, entraînera la vérité de l'éternalisme standard ou d'une nouvelle position : l'*éternalisme atemporel*, à savoir la thèse que toute partie propre du monde naturel existe *simpliciter* et que le contenu matériel du monde naturel ne dépend aucunement d'une localisation particulière en son sein⁴.

Ces affirmations à propos de la non-fondamentalité du temps pourraient frapper le lecteur comme étant pour le moins étranges, puisque la thèse selon laquelle les choses existent dans l'espace

2 Cette théorie de la gravité quantique pourrait s'avérer être une théorie finale du tout, mais il ne doit pas nécessairement en aller ainsi. Certains programmes de recherche de la gravité quantique sont très explicites sur le fait qu'ils ne cherchent pas une théorie finale mais, plus modestement, seulement une explication unifiée de la gravité quantique.

3 Cette caractérisation est très approximative. Toute prise en compte sérieuse de la relativité générale impose de définir l'éternalisme sans recourir aux notions de passé, de présent et de futur de la manière suivante : toutes les entités naturelles existent indépendamment de leur localisation dans le réseau de relations spatio-temporelles ou causales.

4 L'expression « éternalisme atemporel » est déjà utilisée dans la philosophie de la religion et réfère à la thèse que Dieu existe au-delà du temps (voir e.g. Morris 1991). J'utiliserai néanmoins cette expression car elle décrit bien le contenu de la thèse ; il semble y avoir peu de risques de confondre les deux thèses.

et le temps – ou dans l'espace-temps – s'enracine profondément dans notre appareillage conceptuel. Cette étrangeté, combinée au manque de confirmation empirique de ces programmes de recherche et le fait qu'ils manquent d'une formulation complète, explique pourquoi les métaphysiciens pourraient être (et ont été) tentés de préférer tirer des enseignements philosophiques à partir de la physique contemporaine en se focalisant sur nos théories physiques les plus fondamentales qui soient empiriquement confirmées.

Cependant, comme le soutient McKenzie (à paraître), une métaphysique naturaliste basée sur cette physique prend le risque d'être complètement erronée puisque RG et la théorie quantique des champs ne décrivent la réalité, au mieux, qu'approximativement⁵. En réponse au défi de Kerry McKenzie, je propose de déplacer notre attention de la relativité générale et de la théorie quantique des champs et de la reporter sur la gravité quantique. En effet, il me semble que l'argument de McKenzie ne cible pas la métaphysique naturalisée dans son ensemble, mais établit plutôt que la métaphysique naturalisée ne peut pas s'appuyer uniquement sur la physique empiriquement confirmée dans la mesure où cette dernière est constituée de parties non-fondamentales et mutuellement exclusives. La métaphysique ne peut s'appuyer uniquement sur des contraintes philosophiques héritées de deux théories physiques mutuellement exclusives et ignorer les modèles spéculatifs, ou les fragments de théories, qui visent à combiner les deux théories. Toutefois, existe-t-il un chemin épistémologiquement fiable qui mène de la gravité quantique à la métaphysique~? Après tout, l'existence même d'une pluralité d'approches, et leur manque d'une formulation complète, semble barrer la route à toute réponse directe aux débats métaphysiques tels que ceux à propos de l'existence dans le temps.

Il me semble exister deux stratégies prometteuses pour extraire de la connaissance métaphysique à partir de la constellation de programmes de recherche en gravité quantique. La première stratégie, que j'appellerai le *chemin épistémologique ambitieux*, débute par la réalisation que certaines caractéristiques apparaissent dans toutes les approches standards de la gravité quantique. Cette présence globale offre une justification très forte de certaines affirmations à propos de la nature du monde. Par exemple, dans la mesure où la non-localité⁶ apparaît dans toutes les théories de la mécanique quantique ainsi que dans les théories quantiques des champs, et dans la mesure où

5 La pertinence de la gravité quantique pour la métaphysique a été notée à plusieurs occasions ; voir par exemple Huggett et Wüthrich (2013), Muntean (2015) et Norton (2017).

6 La non-localité réfère ici à la propriété attribuée aux systèmes physiques en réponse à la violation des inégalités de Bell.

la gravité quantique ne fait pas disparaître la non-localité, cette caractéristique du monde hérite d'une justification globale à partir de la physique contemporaine considérée dans sa totalité⁷. Ou, pour prendre, un autre exemple, le fait qu'on retrouve une séparation locale entre deux structures qui correspondent plus ou moins à l'espace et au temps dans toutes les approches physiques empiriquement confirmées ainsi que dans toutes les approches de la gravité quantique démontre que notre monde peut être séparé localement en une structure spatiale ou quasi-spatiale d'un côté, et en une structure temporelle ou quasi-temporelle de l'autre côté (cf. Le Bihan et Linnemann 2019). On pourrait généraliser la situation en notant, comme le font Rovelli et Vidotto que :

Pour autant que nous le sachions aujourd'hui, la nature est entièrement constituée de champs quantiques généralement co-variants. (Rovelli et Vidotto 2014, 19)

Saisir exactement l'ontologie qui va avec une description mathématique en termes de champs quantiques généralement co-variants constitue une tâche extrêmement difficile. Je mentionne ce point non pas pour défendre une interprétation ontologique particulière ici, mais seulement pour faire remarquer qu'une étude des programmes de recherche en gravité quantique nous permet de prendre du recul afin d'évaluer quelles parties des révolutions quantique et relativiste vont (au delà d'un doute raisonnable) être préservées dans le futur.

Toutefois, il est difficile d'arpenter le chemin épistémologique ambitieux pour ce qui est de la non-fondamentalité du temps. Ainsi que l'écrit Callender :

La quête de la gravité quantique se manifeste par deux types de stratégies, qui correspondent à deux types d'attitudes à l'égard du temps. Si l'on est de l'opinion que la révolution quantique fournit les fondements les plus solides ou les plus prometteurs, alors (comme avec la théorie des supercordes), on commence à cette étape avec un temps bien en chair (*full-blooded time*). Si, au contraire, on pense que la relativité offre le meilleur point de départ, alors (comme avec la gravité quantique à boucles), on commence avec une théorie dans laquelle le temps est déjà rétrogradé en un certain sens. Dans les deux cas, on sait que le produit final sera sensiblement différent de la relativité et de la mécanique quantique, et l'on ne doit pas nécessairement finir là où l'on a

⁷ Ceci ne nous dit bien sûr pas encore quelle est l'interprétation métaphysique correcte de la non-localité. On pourrait soutenir par exemple qu'elle implique une forme de *monisme de la priorité* (voir Ismael et Schaffer 2016) ou, alternativement, une forme de *cohérentisme* telle que défendue par Calosi et Morganti (à paraître).

commencé. Néanmoins, ces décisions initiales à propos du temps tendent à avoir de sérieuses ramifications dans la suite du programme. *Ce clivage implique qu'il est possible de trouver confirmation d'à peu près n'importe quelle thèse à propos du temps.* (Callender 2017, 99)

Comme nous allons le voir, bien que la théorie des cordes débute avec un temps bien en chair, il est loin d'aller de soi que la théorie des cordes postulera l'existence de l'espace-temps ou du temps au terme de son voyage : différentes opinions co-habitent sur ce sujet dans la communauté cordiste. Toutefois, et par chance, il existe un autre chemin épistémologique, moins ambitieux, que l'on peut arpenter lorsque l'on souhaite extraire des enseignements ontologiques à partir de la physique contemporaine. Au lieu de cibler les hypothèses communes à l'ensemble des approches de la gravité quantique, il est possible d'examiner les *engagements philosophiques spécifiques* de l'un ou de plusieurs programmes de recherche, et de songer aux conséquences pour la métaphysique si cette, ou l'une de ces, approche(s) se révèle correcte. Par exemple, en simplifiant, il est possible d'appréhender la disparition de l'espace-temps dans la *théorie des cordes* comme signifiant au moins la disparition de l'espace, à cause du phénomène de la dualité⁸ et, peut-être comme nous le verrons plus loin, du temps. Au contraire, d'autres approches suggèrent une ontologie sans temps, qui préserve l'existence de l'espace – comme avec *l'ontologie des capsules de temps de Julian Barbour*⁹. Ou il se pourrait bien que l'espace et le temps doivent tous deux sortir de scène, ainsi que le suggère la *gravité quantique à boucles*, comme nous le verrons plus tard.

Cette seconde stratégie, que j'appellerai *le chemin épistémologique modeste* délivre uniquement une *connaissance conditionnelle* : si la gravité quantique à boucle, ou toute autre approche qui nie la réalité du temps, devait être avérée, alors nous aurions de bonnes raisons de souscrire à certaines thèses métaphysiques. Bien que cette approche puisse sembler un peu décevante, la connaissance conditionnelle demeure de la connaissance et ce projet mérite d'être poursuivi. De plus, la construction d'arrière-plans ontologiques en cohérence avec ces approches pourrait même aider à en clarifier le développement – en effet, l'élucidation des ontologies compatibles avec, ou même suggérées par, la gravité quantique, demeure l'objet de recherches présentes¹⁰.

8 Voir par exemple Huggett (2017), Matsubara (2017, 3-4), Le Bihan et Read (2018) et Butterfield (à paraître).

9 Voir Barbour (2001) et Butterfield (2002), Healey (2002), Baron, Evans et Miller (2010), Le Bihan (2015b) pour une discussion philosophique.

10 La question de la détermination des liens qu'entretient la gravité quantique avec l'existence dans le temps n'est pas nouvelle. Monton (2006) en reconnaissant que le présentisme n'est pas compatible avec la relativité restreinte a soutenu que le présentisme pourrait en principe être réhabilité dans le cadre d'une théorie de la gravité quantique ;

Dans la section 2, j'introduirai le débat à propos de l'existence dans le temps. Dans les sections 3 et 4, je présenterai la non-fondamentalité du temps telle qu'on la rencontre dans deux approches de la gravité quantique, à savoir *la théorie des champs bidimensionnels* – qui est une approche de la *théorie des cordes* – et la *gravité quantique à boucles*. Dans la section 5, je soutiendrai que cette non-fondamentalité implique l'éternalisme. Dans la section 6, je présenterai plusieurs interprétations métaphysiques de l'affirmation que le temps disparaît au niveau fondamental, certaines interprétations réalistes semblant offrir, a priori, une possibilité d'échapper à l'éternalisme. Dans la section 7, toutefois, j'examinerai les conséquences de ces interprétations réalistes sur le débat et soutiendrai qu'elles impliquent aussi l'éternalisme. En conclusion, je conclurai que toutes les interprétations philosophiques de la non-fondamentalité du temps impliquent une forme d'éternalisme.

2. Présentisme, non-futurisme, éternalisme

Selon les présentistes, les entités présentes possèdent le privilège ontologique de l'existence~: les entités passées et futures n'existent pas *simpliciter* (voir e.g. Bigelow 1996, Markosian 2004 et Bourne 2006). Pour les éternalistes (voir e.g. Smart 1963, Mellor 1998 et Sider 2001), les entités passées, présentes et futures existent *simpliciter*. Le non-futurisme – également appelé « passé-présentisme » ou « théorie de l'univers-bloc en croissance » (lors-qu'on l'examine en conjonction avec une approche réaliste de l'écoulement du temps, des faits tensés ou d'une autre catégorie d'entités transmettant l'idée d'un devenir primitif et d'un changement dans le contenu matériel de la réalité en fonction du temps de référence) – soutient que les entités passées et présentes, contrairement aux entités futures, existent *simpliciter* (voir e.g. Broad 1923, Tooley 2000 et Button 2006, 2007)¹¹. L'expression *simpliciter* est ici pour montrer que la plupart de ceux qui acceptent la

une idée critiquée par Wüthrich (2010). Les raisons de penser que Wüthrich a raison contre Monton sont à mon sens décisives. Mon objectif dans ce travail est, en partant de ce point, de discuter de l'éternalisme et de la manière de le concilier avec la possible non-fondamentalité du temps.

11 Je réalise que la manière par laquelle j'introduis ces différentes thèses pourra sembler problématique à certains lecteurs. D'un côté, le philosophe de la physique peut prendre ombrage du fait que cette dernière ne prend pas en compte ce que nous avons appris de la relativité générale, à savoir que nous devons éviter toute référence à des entités passées, présentes ou futures, en utilisant à la place les notions d'antériorité et de postériorité dans un cadre de référence pour définir l'éternalisme. D'un autre côté, le métaphysicien peut faire remarquer qu'il est possible d'appréhender le problème différemment, par exemple en évitant d'user de la notion d'existence *simpliciter*. Voir e.g. Crisp (2004) et Deasy (2017) pour une discussion de ce point. Toutefois, la classification un peu *old-school* que

pertinence du débat font appel à la notion d'existence *simpliciter*, bien distincte de la notion d'existence à un instant. Par exemple, le platonisme à propos des entités mathématiques, à savoir la thèse selon laquelle les entités mathématiques existent, est habituellement appréhendée comme la thèse que les entités mathématiques existent *simpliciter* – et non avec une localisation temporelle particulière ou à chaque instant. Le débat à propos de l'existence dans le temps, de la même manière, débute avec l'hypothèse qu'il est censé de s'interroger sur le fait de savoir si les entités passées et futures existent *simpliciter* ou non. Il est important de noter ici que tous les participants de ce débat s'accordent sur le fait que les entités passées n'existent plus et que les entités futures n'existent pas encore. Ce sur quoi ils sont en désaccord est le fait de savoir si nous devons inférer de l'affirmation que les entités passées n'existent plus qu'elles n'existent pas *simpliciter* ou si, au contraire, nous devons conclure que les entités passées existent bel et bien *simpliciter*, avec une localisation temporelle distincte de celle du présent (de même pour les entités futures)¹².

L'éternalisme et le présentisme ont des avantages et des inconvénients symétriques. L'éternaliste peut aisément rendre compte des vérificateurs des énoncés à propos du passé. Certaines parties de l'espace-temps, appréhendées au sens large de façon à y inclure leurs contenus matériels, agissent comme les vérificateurs de ces énoncés. Par exemple, si j'énonce « hier, j'étais à Chicago », cet énoncé est vrai car il existe une partie spatio-temporelle de la réalité – le volume de l'espace-temps qui correspond à la journée d'hier à Chicago – qui le rend vrai. Toutefois, il semble difficile pour l'éternaliste de rendre compte de l'intuition que les faits futurs contingents ne sont pas fixés. En effet, en soutenant que les entités futures existent, nous devons faire face à une menace de *déterminisme existentiel*~: si le contenu matériel de l'espace-temps à la date de demain (i.e., dans un cadre relativiste, quelques heures en avant dans le cône de lumière futur) est déjà là, signifiant qu'il existe là-bas dans le futur relativement à ici, la contingence de ces événements semble perdue. Par exemple, si j'affirme que « demain, je serai à Oxford », cet énoncé est déjà vrai maintenant, puisque le fait qui le rend vrai s'enracine dans une partie de l'espace-temps¹³. Les présentistes rencontrent des difficultés et des points positifs symétriques~: ils peuvent expliquer pourquoi les faits futurs contingents ne sont pas fixés en soulignant que le futur n'existe pas. Toutefois, ils sont en difficulté

j'utilise ici est utile pour introduire, en première approche, la manière intuitive d'appréhender ces théories.

12 Certains philosophes de la physique tels que Dorato (2006) ont soutenu ou examiné la thèse selon laquelle ce débat manque de substance. A la suite de Wüthrich (2012), je tiendrai pour acquis dans le cadre de ce travail que l'existence temporelle est un sujet important et substantiel qui mérite d'être exploré plus en avant.

13 Voir Le Bihan (2015a, 2019) toutefois pour une défense de la thèse de la compatibilité de l'éternalisme avec l'ouverture du futur.

en ce qui concerne les vérificateurs des énoncés à propos du passé car le passé n'existe pas *simpliciter*. Pour ce qui est de ses avantages, le présentiste peut aisément rendre compte du fait que l'énoncé « demain je serai à Oxford » n'a pas encore de valeur de vérité~: cet énoncé n'a tout simplement pas de vérificateur. Il rend ainsi compte de nos intuitions ordinaires que le futur n'est pas (au moins complètement) fixé. Pour ce qui est de ses inconvénients, en refusant l'existence du monde à la date de demain, les énoncés du type « hier j'étais à Chicago » sont menacés de perdre leur vérité, et le passé se voit menacé de perdre son caractère fixé.

Lorsqu'on en vient à la relativité, il est important de noter que plusieurs tentatives de réconciliation du présentisme avec la relativité restreinte et/ou générale ont été proposées, telles que la ré-interprétation néo-lorentzienne de la relativité restreinte (Craig 2001), l'approche fragmentaliste de la relativité restreinte (Fine 2005) et des approches utilisant la cosmologie ou la gravité quantique pour ressusciter une foliation objective de l'espace-temps (Monton 2006). Cependant, elles échouent toutes pour diverses raisons que je ne peux pas synthétiser ici. Pour une présentation générale, et pourquoi « tout présentisme qui demeure compatible avec les faits empiriques et notre meilleure physique est métaphysiquement répugnant », voir Wüthrich (2013). Pour une explication de pourquoi le paramètre appelé « temps cosmologique » que l'on trouve dans le modèle standard de la cosmologie du big bang, basée sur la relativité générale, n'aide pas à ressusciter une stratification globale de l'espace-temps sur laquelle le présentiste puisse s'appuyer, voir Wüthrich (2013) et Smeenk (2013)¹⁴.

Le non-futurisme pourrait apparaître comme une troisième voie attrayante. En postulant que les entités passées et présentes – contrairement aux entités futures – existent, le non-futurisme pourrait, *prima facie*, hériter des avantages à la fois de l'éternalisme et du présentisme, tout en échappant à leurs problèmes respectifs. Il est vrai qu'hier je me trouvais à Chicago car la partie de l'espace-temps correspondant à la date d'hier existe *simpliciter* et m'inclut (ou disons, inclut l'une de mes contreparties temporelles, ou encore l'une de mes parties temporelles). Au contraire, le fait que je serai à Oxford demain n'est pas fixé car il n'existe rien de tel qu'un volume de l'espace-temps qui corresponde à la date de demain et incluant le contenu matériel requis. Malheureusement, le non-futurisme entre en conflit avec la relativité générale de la même manière que le présentisme. Le non-futurisme a besoin d'une tranche objective de l'espace-temps qui corresponde à la bordure de l'être.

14 Une autre option radicale est de remplacer RG par une autre théorie qui lui soit empiriquement équivalente dans son secteur pertinent de solutions – à savoir l'ensemble des solutions à même de décrire le monde actuel – et qui s'appuie sur une ontologie différente. On trouve cette approche à l'oeuvre avec la *dynamique des formes* (*shape dynamics*) (voir e.g. Gomes *et al.* 2011).

Toutefois, d'après la relativité générale, cette foliation de l'espace-temps en couches spatiales n'existe tout simplement pas.

La prochaine section aura pour objet la possible disparition du temps au sein des deux principales approches de la gravité quantique : la *théorie des cordes* et la *gravité quantique à boucles*.

3. Le temps dans la théorie des cordes

Le statut du temps dans l'approche la plus populaire de la gravité quantique, à savoir la *théorie des cordes* (TC désormais) ne va pas de soi. En effet, il existe une interprétation ontologique influente qui rejette l'existence du temps – et, en cela, bien que TC soit généralement formulée à l'aide d'un « temps bien en chair », pour utiliser l'expression de Callender, le temps peut être appréhendé comme une béquille théorique que l'on peut abandonner une fois arrivé à destination. D'après cette *ontologie de champs bidimensionnels*, adoptée par l'un des cordistes les plus influents, Edward Witten, l'espace-temps – incluant ses aspects spatiaux et temporels – n'existe pas (voir Witten 1996, ré-imprimé dans Callender et Huggett 2001 et Huggett, Vistarini et Wüthrich 2013, section 3, Huggett 2015 et Baker 2016, section 4.2 pour un traitement philosophique). Witten écrit ainsi~:

... On n'a plus vraiment besoin de l'espace-temps ; on a simplement besoin d'une théorie de champs bidimensionnels décrivant la propagation des cordes. Et, peut-être en allant encore plus loin, on n'a plus d'espace-temps, si ce n'est dans la mesure où l'on peut l'extraire d'une théorie de champs bidimensionnels. (Witten 1996, 28)

Alors, que sont ces champs bidimensionnels exactement~? Afin de le comprendre, commençons par esquisser l'image ontologique à l'oeuvre dans TC¹⁵.

Les cordes sont des entités spatiales à une dimension qui persistent dans le temps, si bien qu'il est possible d'appréhender toute corde perdurante (i.e. étalée dans le temps) comme une *feuille de monde bidimensionnelle*¹⁶. On peut alors définir un *espace-temps interne* – qui correspond à la feuille

15 Pour le philosophe aux compétences techniques~: je commence par esquisser la théorie perturbative des supercordes – je ferai ensuite un certain nombre de commentaires à propos de ce que l'on est en droit d'attendre, ontologiquement parlant, d'une théorie M non-perturbative.

16 L'ontologie de TC inclut aussi parfois des branes, c'est-à-dire des entités à n dimensions étendues dans le temps, et donnant lieu à des géométries à $n+1$ dimensions. Dans cette approche des champs bidimensionnels, les branes ne font pas parties des briques méréologiques qui construisent le monde.

de monde bidimensionnelle balayée par les cordes – vivant dans un espace-temps d'arrière-plan à dix dimensions. En fonction de la manière que l'on a d'appréhender le problème de la mesure et la notion de superposition quantique au niveau de la feuille de monde, on peut accoucher d'une ontologie avec des espace-temps internes superposés (en souscrivant à une approche des mondes multiples de cette superposition), requérant une connexion entre une multiplicité et une singularité – entre les feuilles de monde fondamentales et un seul et unique espace-temps relativiste émergent – ou une connexion entre une multiplicité et une autre multiplicité – entre une superposition quantique de feuilles de monde et une superposition quantique d'espaces-temps relativistes. Ceci dépend du rôle joué par l'émergence dans l'analyse de la transition du quantique au classique, et de l'analyse même qui est donnée de la superposition¹⁷. Chaque corde possède quelques propriétés. Certaines de ces propriétés, les vibrations, correspondent à des particules physiques. Notons qu'à cette étape nous avons *deux structures* qui pourraient être appelées « espace » ou « espace-temps » au sein de l'ontologie de TC~: *l'espace-temps interne bidimensionnel* associé à la collection de cordes fissionnant et fusionnant et *l'espace-temps d'arrière-plan à dix dimensions* que les cordes habitent.

On peut désormais se poser la question de savoir laquelle de ces deux structures, pour peu qu'il y en ait une, correspond à *l'espace-temps de RG* et, par extension, à *l'espace et au temps tels que nous les expérimentons quotidiennement* – dans la mesure où l'espace et le temps tels que nous les percevons ordinairement peuvent se voir appréhendés comme des abstractions locales à partir de l'espace-temps RG. Dans le but de simplifier la discussion, il est utile à la suite de Huggett (2017) et d'un usage particulier au sein de la communauté de la philosophie de la gravité quantique, de référer à la conjonction de l'espace-temps RG et de l'espace et du temps ordinaires comme à l'espace-temps « phénoménal » – qui ne doit en aucune façon être identifié à l'espace et au temps *phénoménologiques* tel qu'on les entend habituellement dans la communauté philosophique plus large, à savoir à l'espace et au temps tels que nous les expérimentons ordinairement. La question primordiale pour le métaphysicien du temps est alors la suivante : *devons-nous identifier l'espace-temps phénoménal avec l'espace-temps interne, avec l'espace-temps d'arrière plan, ou avec aucune de ces deux structures~?* En d'autres termes, quelle est la structure pertinente dans l'ontologie de TC pour aborder les questions métaphysiques à propos de la nature du temps~?

17 De plus, on peut s'interroger : cette image a-t-elle du sens dans le cas où les cordes n'interagissent pas menant, semble-t-il, à l'existence d'une pluralité d'espaces-temps internes déconnectés ? Ce point été mentionné par Keizo Matsubara, d'après Baker (2016, 10). Il s'agit d'un problème intéressant pour l'approche bidimensionnelle ; toutefois, celui-ci n'est pas nécessairement rédhibitoire. En effet, il pourrait très bien être le cas que le monde actuel est constitué d'îles causalement déconnectées (voir e.g. Bricker 2001).

Considérons la réponse peut-être la plus évidente à cette question~: *l'espace-temps phénoménal est l'espace-temps d'arrière-plan* d'une manière telle que la théorie des cordes se contente d'énoncer que l'espace-temps physique est constitué de dix, et non de quatre, dimensions, l'une de ces dimensions étant le temps. S'il devait en aller ainsi, alors TC ne nous dirait rien de plus que RG à propos du temps. Toutefois, il existe une symétrie profonde dans les descriptions des espaces d'arrière-plan, les dénommés « espaces cibles » – à savoir la dualité T – qui rend les espaces d'arrière-plan avec différents rayons de compactification *physiquement équivalents*. Une interprétation naturelle du cœur commun des descriptions duales¹⁸ mène alors à l'affirmation selon laquelle cette structure n'est pas identique à l'espace-temps phénoménal, qui ne possède pas de rayon de compactification déterminé. Cette dualité T semble impliquer que *l'espace d'arrière-plan n'est pas réel et constitue un piètre candidat pour jouer le rôle de l'espace phénoménal*. Toutefois, cette dualité qualifie l'espace d'arrière-plan et non le temps d'arrière-plan – donc, d'après cette approche le temps demeure fondamental et le problème ne se pose que pour l'émergence de l'espace-temps RG à partir de l'espace d'arrière-plan.

Qu'en est-il de de *l'espace-temps interne*? Est-il possible, au sein de ce schéma, d'identifier le temps avec le temps interne de la feuille de monde? Il s'agit de l'approche des champs bidimensionnels~: les feuilles de monde, qui interagissent et composent la feuille de monde globale et complexe, sont appréhendées comme les *briques de construction du monde physique*. Au lieu d'aborder les cordes comme des entités qui évoluent à l'intérieur de l'espace-temps d'arrière-plan, dans ce schéma, la dénommée structure d'arrière-plan est appréhendée non pas comme l'espace-temps, mais comme un *champ de vecteurs à dix dimensions* vivant à la surface de la feuille de monde bidimensionnelle (pour une présentation plus technique, voir Huggett, Vistarini et Wüthrich 2013, 251-252). Le monde serait littéralement constitué de deux dimensions au niveau fondamental, d'une manière telle que la plupart de la complexité que nous observons à notre échelle émergerait des fluctuations très complexes de champs localisés à la surface de la feuille de monde. Quelles sont alors les conséquences pour la nature du temps si l'espace-temps interne est la structure la plus proche de l'espace-temps phénoménal? Comme l'expliquent Huggett, Vistarini et Wüthrich (2013, section 3), ce temps interne obéit à une *symétrie conforme* et donc, à une *invariance d'échelle*~: les attributions de durées entre des points à l'intérieur de la feuille de monde sont des quantités qui peuvent être choisies arbitrairement, sans produire la moindre différence physique dans la feuille de

18 Il existe d'autres interprétations ontologiques de la dualité (voir e.g. Le Bihan et Read 2018). Toutefois ce qui importe ici c'est que, comme l'indique Huggett (2017), ces interprétations tiennent généralement pour acquis que nous n'avons aucune raison d'identifier l'espace-temps RG avec une seule et unique structure d'arrière-plan, barrant la route à toute identification de l'espace-temps RG avec n'importe laquelle des structures d'arrière-plan.

monde¹⁹. Ceci implique que, bien que l'*ordre spatio-temporel* demeure présent dans ce schéma, il n'existe aucun état de chose à propos de *distances temporelles* définies (à savoir des durées) connectant des couples d'événements (i.e. des points de la feuille de monde)²⁰.

4. Le temps dans la gravité quantique à boucles

Tournons-nous maintenant vers la *gravité quantique à boucles* (QGB ci-dessous), l'un des programmes de recherche les plus prometteurs qui nient l'existence fondamentale du temps. D'après QGB, ce qui existe en lieu et place de l'espace-temps ce sont des entités (ou une structure) *décrites par* des « réseaux de spin » – à savoir, des collections de nœuds et de relations (les boucles) existant centre ces nœuds (voir Rovelli 2004 et Rovelli et Vidotto 2014; pour un résumé philosophique destiné aux philosophes, cf. Huggett et Wüthrich 2013, 279-280). Ces représentations 3D de réseaux de spin peuvent être remplacées par des représentations 4D appelées « mousses de spin » lorsqu'on applique une évolution aux réseaux de spin. Une conjecture est que les mousses de spin ressemblent suffisamment à l'espace-temps RG pour rendre compte du succès empirique de RG. Les mousses de spin décrivent des volumes et des aires possédant des valeurs discrètes. Une question qui se pose alors est de savoir quelle est la nature de la relation entre ces structures discrètes et la structure continue RG. Toutefois, il ne s'agit pas du point le plus essentiel. Le point crucial est que cette description de la structure à l'aide d'entités géométriques discrètes ne doit pas être confondue avec *la structure fondamentale du monde* ; celle-ci doit plutôt être appréhendée comme une manière utile de la représenter et de gérer ses états quantiques (cf. Rovelli et Vidotto 2014 et la discussion par Wüthrich 2017 et Healey à paraître, section 3). L'ontologie sous-jacente est appréhendée comme n'incluant pas l'espace-temps (discret ou non)²¹.

Il me paraît juste d'affirmer, à la suite de Healey (à paraître), qu'à l'heure actuelle il n'existe aucun consensus parmi les physiciens à propos de la nature ontologique de la structure QGB cachée

19 De manière plus technique~: « l'action demeure invariante suite à tout re-dimensionnement local et arbitraire de la métrique des cordes » (Huggett, Vistarini et Wüthrich 2013, 254).

20 On pourrait soulever l'objection que le développement d'une théorie des cordes non-perturbative pourrait remettre en cause le fait que l'approche des champs bidimensionnels est une ontologie naturelle de TC. C'est tout à fait juste. Toutefois, premièrement nous ne disposons pas d'une telle théorie à l'heure actuelle et, deuxièmement, la théorie M pourrait demeurer compatible avec une ontologie bidimensionnelle, dans la mesure où cette dernière, après tout, est supposée servir d'approximation à la théorie M. Pour ces deux raisons, les conséquences ontologiques de l'approche bidimensionnelle méritent d'être examinées.

21 Voir Norton (2015).

derrière la structure mathématique de mousse de spin. Il est possible de distinguer deux approches afin de rendre compte de cette structure fondamentale. De deux choses l'une~: ou bien cette structure fondamentale possède suffisamment de structure spatio-temporelle pour se voir décrite comme un *quasi-espace-temps*, ou bien ce n'est pas le cas. Dans le cadre de la première option, la structure fondamentale est un « quasi-espace-temps » qui est très différent de l'espace-temps ordinaire – à savoir l'espace-temps tel qu'on le théorise à l'aide de RG. Toutefois, cette structure possède également un certain degré de similarité avec l'espace-temps ordinaire, phénoménal, en partageant des propriétés avec l'espace-temps RG (par exemple en étant fait de relations physiques concrètes organisées en réseau). Ainsi dans cette approche, cette structure partage le profil métaphysique de l'espace-temps RG en appartenant à la catégorie générale des « *espace-temps physiques* ». Dans le cadre de la seconde option, la structure GQB doit plutôt être appréhendée en des termes purement algébriques. Cette approche implique qu'il est impossible de rendre compte de la structure GQB à l'aide des catégories métaphysiques habituellement d'usage pour concevoir le monde spatio-temporel naturel (relations, propriétés, événements, etc.) et que le contenu de cette boîte noire ne devrait pas être analysé à l'aide de ces catégories métaphysiques.

Il est important de réaliser ici que, indépendamment de la manière que nous avons de concevoir le statut de la structure fondamentale, l'organisation de la structure GQB ne correspond pas systématiquement à la structure spatio-temporelle qui ordonne les événements, telle que décrite par RG~: en effet, dans certains modèles de GQB, certaines *relations d'adjacence* dans la structure GQB correspondent à des *relations de longue distance spatio-temporelle* au sein de la structure RG. Voir e.g. Markopoulou et Smolin (2007) et Huggett et Wüthrich (2013, 279-280) pour une discussion philosophique²². Ceci implique en particulier qu'il arrive parfois que ce que nous appréhendons comme de longues distances temporelles dans RG correspond en fait à des relations d'adjacence dans GQB. Et il est important de voir que ce point est vrai indépendamment de l'attitude adoptée à l'égard de la nature de la structure fondamentale. Ce qui importe ici ce n'est pas le fait de savoir si la boîte noire est « métaphysiquement vide », en étant uniquement décrite par des mathématiques algébriques, ou s'il est possible d'attribuer une structure métaphysique interne à cette structure

22 Cette localité désordonnée demeure quelque peu spéculative pour deux raisons. Premièrement, la localité désordonnée s'applique à l'espace, dans certains modèles. Il est raisonnable de s'attendre à ce qu'elle s'applique également aux événements séparés par un intervalle de genre temps, mais il s'agit d'une conjecture. Deuxièmement, puisque nous n'avons pas de théorie GQB entièrement développée, il est impossible d'exclure la possibilité que la localité désordonnée en général soit la manifestation d'un artefact mathématique, la vidant ainsi de son contenu physique.

physique en termes de relations et de nœuds, par exemple. Ce qui importe est que la manière par laquelle nous devons attribuer des états quantiques à la boîte noire – indépendamment de ce qui existe dans la boîte noire – dévie du système de localité décrit dans RG. Donc, ce n'est pas seulement la transition d'une structure discrète (dans GQB) à une structure continue (dans RG), ou la transition du quantique au classique, qui est mise en question par la non-existence d'un temps fondamental dans GQB. L'existence même d'un *ordre partiel des événements* tel qu'on l'observe dans la vie quotidienne, et tel qu'on le conceptualise avec RG, pourrait être une simple approximation à notre échelle de ce qui est réellement le cas.

5. Les conséquences pour l'existence dans le temps

Par conséquent, si des travaux ultérieurs venaient à nous montrer que la bonne interprétation ontologique de TC n'inclut pas le temps, nous nous retrouverons dans une situation où les deux approches les plus populaires de la gravité quantique affirment que le temps est absent de notre description la plus fondamentale du monde naturel. Cela nous donnerait des indices solides en faveur de la non-fondamentalité du temps conformément à la voie épistémologique ambitieuse que j'ai mentionnée dans l'introduction. Je ne prendrai cependant pas position sur ce point ; dans le cadre de cet article, je me contenterai de souligner, en adoptant la voie épistémologique modeste, que *certaines* approches de la gravité quantique impliquent la non-fondamentalité du temps.

Cette négation de l'*ordre partiel des événements* dans GQB, et de la *durée* dans l'approche 2D de TC, est plus radicale que ce que l'on trouve habituellement dans la littérature philosophique récente. En effet, dans la littérature métaphysique et phénoménologique, il est assez courant de soutenir que le temps ne s'écoule pas (la théorie B relativement standard), et que la notion de flux correspond à un artefact perceptif ou linguistique (voir par exemple Paul 2010, Benovsky 2015 et Frischhut 2015). De plus, il est parfois avancé que le temps ne possède pas de direction intrinsèque (la théorie C selon laquelle la dimension temporelle n'est faite que de relations non orientées). Dans un cadre relativiste, ces affirmations reviennent respectivement à affirmer que l'espace-temps ne s'écoule pas le long d'une direction temporelle, ou que l'espace-temps ne possède pas de direction intrinsèque. Toutefois, il est presque universellement admis que, bien que l'espace-temps soit moins temporel que ce que l'on pense généralement, il existe une *scission locale* entre l'espace et le temps dans le monde actuel (voir par exemple Callender 2017, chapitre 6)²³.

23 Pour tout volume quadridimensionnel dans l'espace-temps, la dimension temporelle diffère des trois dimensions spatiales en ce qui concerne plusieurs caractéristiques. Pour donner un exemple simple, RG correspond localement à

Comment la non-fondamentalité du temps, dans les contextes GQB et TC, se compare-t-elle à ces affirmations métaphysiques à l'encontre de l'existence de certaines caractéristiques habituellement attribuées au temps ? Ces approches ne se concentrent pas sur des propriétés dispensables appartenant à la conception riche du temps telles que l'écoulement et la directionnalité intrinsèque, mais sur des *propriétés centrales* du temps : l'*ordre* et les *distances temporelles*. Toutefois, ces attaques sur les propriétés centrales du temps ne sont pas aussi radicales qu'elles pourraient l'être car ces approches préservent une distinction entre les structures quasi-spatiales et quasi-temporelles, à savoir une scission locale entre le quasi-espace et le quasi-temps, comme dans RG (voir Le Bihan et Linnemann 2019, section 3.2). Cette situation conduit à un verdict subtil : les deux approches les plus prometteuses de la gravité quantique impliquent la non-fondamentalité du temps si la durée et/ou l'ordre partiel des événements décrit par RG sont considérés comme des propriétés essentielles du temps ou, en d'autres termes, comme des conditions nécessaires à l'existence du temps. Cependant, si la seule condition nécessaire pour que le temps existe est la possibilité de distinguer localement dans la structure un ensemble de directions spéciales, alors GQB et l'approche des champs bidimensionnels de TC n'impliquent pas la non-fondamentalité du temps. A la suite de Le Bihan (2015b), je supposerai que cette question est une simple question linguistique, et je me concentrerai sur une question plus substantielle~: dans les deux cas en question, avons-nous *suffisamment de temps* pour formuler les thèses classiques à propos de l'existence dans le temps~?

Dans le contexte de GQB, la localité désordonnée entre en conflit avec le présentisme, le non-futurisme et, nous le verrons, requiert une compréhension particulière de l'éternalisme. Le présentisme et le non-futurisme reposent sur l'idée d'une séparation globale entre trois zones de réalité : le passé, le présent et l'avenir. En RG, cette séparation globale doit être imposée sur le modèle, qui n'offre en lui-même aucune raison de croire qu'il en existe une telle chose. Toutefois, admettons qu'il en soit ainsi pour les besoins de l'argumentation. Disons que $[a, b, c, d, e]$ est un ensemble ordonné d'événements séparés par un intervalle de genre temps, reliés de manière causale par une ligne d'univers dans la description RG et que GQB décrit ces entités comme~: a', b', c', d' et e' . Supposons maintenant que nous soyons localisés à c et qu'il existe une foliation objective

la description donnée par la relativité restreinte, en ce sens que l'on peut toujours choisir un système de coordonnées local tel qu'à son origine~: (1) la métrique prend la forme de la métrique de Minkowski, et (2) les équations dynamiques la matière restent invariantes sous les transformations de Lorentz. Cela signifie également que la structure hérite de la scission propre à la relativité restreinte, au moins localement. Mais notez que notre monde actuel distingue l'espace et le temps de diverses façons, apparemment logiquement indépendantes : Callender nomme cette caractéristique la « fragmentation du temps » (Callender 2017, chap. 6).

sélectionnant une tranche spéciale de l'espace-temps incluant c . Cette foliation *imposée au niveau macroscopique apparaîtra dans la description fondamentale du GQB comme étant en conflit avec la localité désordonnée*. Par exemple, bien que l'événement b soit causalement avant c , et que l'événement d soit causalement après c dans la description de RG, la localité désordonnée implique qu'il arrive parfois dans la description du GQB que c' ne soit *pas entre* b' et d' (en raison de l'existence d'un ordre différent, et en excluant le cas des événements séparés par un intervalle de genre espace). Par conséquent, la foliation macroscopique utilisée pour distinguer les zones objectives passées, présentes et futures de l'espace-temps macroscopique ne peut être qu'une approximation statistique, obtenue en négligeant les localités désordonnées. Mais si la foliation macroscopique est une approximation statistique, alors il semble invraisemblable qu'elle puisse décrire les articulations de la nature. Il s'agit là d'un problème pour le présentisme et le non-futurisme car l'existence d'une foliation macroscopique permettant de décrire les articulations de la nature est une condition préalable nécessaire pour définir ces vues. Qu'en est-il de l'éternalisme ? Comme l'éternalisme n'a pas besoin de s'appuyer sur une véritable séparation métaphysique entre le passé, le présent et le futur (c'est-à-dire sur une théorie A), il peut éviter ce problème. Cependant, même la théorie B éternaliste – à savoir, la théorie selon laquelle toutes les choses naturelles existent indépendamment de leur emplacement dans le réseau de relations spatio-temporelles ou causales – est menacée dans une certaine mesure par la localité désordonnée : si l'ordre causal des événements, qui fait partie de l'ontologie selon la théorie B, n'est qu'une approximation statistique, alors la structure causale fondamentale du monde quadridimensionnel émerge et ne peut pas être utilisée pour définir l'éternalisme.

Par conséquent, la localité désordonnée exige d'adopter un autre point de vue sur l'existence *simpliciter* dans le monde naturel. J'appelle cette thèse « éternalisme atemporel » : toutes les parties du monde naturel existent *simpliciter* et le contenu matériel du monde naturel ne dépend pas d'un endroit particulier. On pourrait songer que cette thèse de l'atemporalité, qui découle de la localité désordonnée, ressemble à l'éternalisme standard en ce qui concerne l'existence – et elle lui ressemble en effet beaucoup. En fait, l'intérêt de développer une thèse appelée « éternalisme atemporel » est de clarifier le fait que l'éternalisme n'est que superficiellement lié à l'existence du temps. Ce qui importe avec l'éternalisme, ce n'est pas que toutes les choses existent de manière égale dans le temps, mais plutôt que toutes les choses qui font partie du monde naturel existent de manière égale. Cet éternalisme de base peut alors être complété par l'idée que le système de localisation qui nous permet de cibler différentes parties du monde naturel devrait être formulé en termes de temps ou d'espace-temps dans un cadre spatio-temporaliste – ou, au contraire, dans une ontologie non-spatio-

temporaliste, avec un système de localisation non-spatio-temporel. En effet, la question de savoir si l'éternalisme « atemporel » est ou non un éternalisme standard bien conçu est une affaire de terminologie qui peut recevoir diverses réponses raisonnables. Ce qui importe ici, c'est que cette nouvelle approche de l'éternalisme – indépendamment du fait que l'on veuille le classer comme une forme d'éternalisme standard ou comme un nouveau type d'éternalisme – est plus radicale en préservant l'idée fondamentale qui sous-tend l'éternalisme, à savoir que l'existence n'est pas limitée à notre environnement spatio-temporel immédiat²⁴, sans s'engager davantage dans l'affirmation selon laquelle il existe un moyen, soit dans les termes de la théorie A, soit dans les termes de la théorie B, de découper d'une manière qui ne soit pas approximative le cosmos quadridimensionnel en hypersurfaces 3D. En d'autres termes, selon l'éternalisme atemporel, *toute entité physique, indépendamment de son emplacement dans la structure fondamentale, existe simpliciter et ne dépend pas pour son existence d'un point de référence particulier dans la structure*. Il n'y a pas de changement dans le contenu matériel de la réalité parce qu'il n'y a pas de temps objectif, et la réalité – prise dans son ensemble – ne change pas. Comparons cela à l'éternalisme standard~: par rapport à n'importe quel temps t , toutes les autres entités situées dans le temps à d'autres instants existent *simpliciter* – puisque l'existence *simpliciter* ne dépend pas de l'emplacement temporel dans la structure temporelle. Ou, dans un cadre relativiste, par rapport à toute partie de l'espace-temps, toutes les autres parties de l'espace-temps, y compris leur contenu matériel, existent *simpliciter*. Dans l'éternalisme standard, on trouve une référence au temps – ne serait-ce que pour prétendre que cette référence ne contraint pas ce qui existe – alors que dans l'éternalisme atemporel, une telle référence fait défaut. Toutefois il est important de noter que les deux points de vue s'accordent à dire que la portée de l'existence *simpliciter* ne dépend d'aucun point de vue dans la structure (temporelle ou atemporelle)~: l'existence n'est pas une affaire *locale*. En d'autres termes, indépendamment de l'emplacement de référence dans la structure non-spatio-temporelle, l'étendue de ce qui existe portera sur la totalité des entités physiques existant dans la structure physique ou constituant celle-ci. En tant que tel, l'éternalisme atemporel est fidèle à l'esprit de l'éternalisme standard, en rejetant la possibilité de

24 Le lecteur pourrait objecter que cette expression d'« environnement » n'a pas de sens dans ce contexte. Toutefois, s'il en va ainsi alors cela renforce le fait que nous n'avons pas affaire ici à un éternalisme standard. En outre, le sens de cette expression dépend de la question de savoir si la structure fondamentale QGB doit être identifiée à un *quasi-espace* ou non. S'il s'agit d'un quasi-espace, alors il devrait en principe être possible pour cette structure d'avoir suffisamment de caractéristiques géométriques pour utiliser des prédicats quasi-spatiaux significatifs modelés sur des prédicats spatiaux.

distinguer localement (en termes de théorie A ou de théorie B) les zones de temps, mais va plus loin dans la négation des termes classiques du débat.

En affirmant que les deux approches les plus prometteuses de la gravité quantique impliquent la non-fondamentalité du temps et donc, comme nous venons de le voir, l'éternalisme (standard ou atemporel), nous pouvons conclure en suivant le *chemin épistémologique modéré* que nous disposons de preuves substantielles, mais pas absolues, en faveur de la vérité d'une sorte d'éternalisme²⁵.

6. Eliminativisme, réductionnisme et la thèse du temps dérivé

Passons maintenant à la question de savoir ce que signifie le fait que le temps (c'est-à-dire, selon le contexte, la durée ou l'ordre temporel) n'existe pas *fondamentalement*. En effet, on peut avancer que si le présentisme, le non-futurisme et l'éternalisme standard ne s'appliquent pas au niveau fondamental de description, il se peut néanmoins, selon certaines hypothèses, que ces thèses décrivent correctement le monde à d'autres échelles de description. Afin d'examiner cette possibilité, je distinguerai entre *trois conceptions de la non-fondamentalité du temps*. Les trois interprétations suivent de près une classification avancée par Le Bihan (2018a, b), Le Bihan et Linnemann (2019) et Le Bihan (à paraître~a) sur la non-fondamentalité de l'*espace-temps*. Comme nous allons le voir, cette classification se révèle tout aussi utile pour aborder le cas de la non-fondamentalité du *temps*.

25 L'approche peut-être la plus célèbre de la gravité quantique qui, selon certains, est cohérente avec – ou même suggère – une interprétation de l'univers-bloc en croissance est la *théorie des ensembles causaux* (voir par exemple Rideout et Sorkin 1999, Dowker 2006, Dowker 2014 et Earman 2008, Huggett 2014, Wüthrich 2012b, 2016 et Callender 2017, section 5 pour une discussion philosophique). Bien que je ne puisse pas entrer dans les détails ici, je tiens simplement à souligner que dans cette approche, la croissance n'est que *locale*. Comme l'écrit Callender (2017, 100)~: « [le] processus de 'naissance' est appréhendé comme se déployant de manière 'généralement covariante' ». Il n'existe donc pas de moyen unique de regrouper différents ensembles causaux qui ne sont pas liés entre eux et de prendre position sur ceux qui existent effectivement du point de vue d'un ensemble causal particulier. Dans cette approche, il est tout simplement impossible de quantifier sur ce qui existe dans d'autres séquences causales du point de vue d'un ensemble causal particulier. C'est pourquoi cette thèse de la croissance ne correspond pas à ce que l'on trouve dans le bouquet classique de thèses constituant la théorie de l'*univers-bloc en croissance* et incluant la composante non-futuriste. Cette vision pourrait être décrite de manière plus adéquate comme une « *théorie de la pieuvre en croissance* », car on pourrait penser (métaphoriquement) que toutes les différentes croissances déconnectées de manière causale sont les tentacules d'un pieuvre se déployant indépendamment les unes des autres. (Notez que la métaphore n'est pas tout à fait exacte puisque les tentacules se divisent indéfiniment en de nouveaux tentacules.)

En philosophie de l'esprit, on peut distinguer différentes questions~: les *problèmes faciles* et le *problème difficile de la conscience*. Les problèmes faciles consistent à trouver les conditions nécessaires et suffisantes pour l'existence d'états mentaux, formulés en termes scientifiques, ainsi qu'à rendre compte de l'intentionnalité. En revanche, le problème difficile de la conscience porte sur l'interprétation ontologique correcte de la relation qu'entretient la conscience avec le monde physique. Quelle est la source des corrélations entre les états mentaux et les états physiques~? Observons-nous ces corrélations parce que le mental est identique à des phénomènes physiques~? Ou avons-nous ici des types distincts de substances ou de propriétés liées par une relation quelconque~? Ou cela signifie-t-il que le mental est une pure illusion et n'existe pas~? Avec la conscience, en raison de l'aspect qualitatif de notre expérience, de « l'effet que cela fait d'expérimenter », et de son aspect subjectif, du fait que ces expériences semblent pointer dans la direction d'un sujet ayant ces expériences, nous développons une riche terminologie assez difficile à traduire dans le vocabulaire de la physique. Il semble que nous ayons un mystère à résoudre, à savoir la présence d'un fossé explicatif apparent entre deux mondes terminologiques qui semblent être très différents : le monde physique et le monde mental. On dit que ce problème est difficile car il ne semble pas que la science puisse nous aider à le résoudre. Ce problème semble quelque peu abstrait, et s'enracine peut-être dans les concepts que nous utilisons pour décrire le monde.

Un *problème difficile de l'espace-temps* similaire apparaît dans une certaine mesure dans le contexte de l'émergence de l'espace-temps~: il semble que proposer une dérivation formelle d'une théorie spatio-temporelle à partir d'une théorie non-spatio-temporelle ne suffise pas à donner du sens, ontologiquement parlant, à l'apparente divergence conceptuelle entre les notions primitives de la théorie spatio-temporelle, et les notions primitives de la théorie non-spatio-temporelle (voir Maudlin 2007 pour une discussion de la question en mécanique quantique, Huggett et Wüthrich 2013 pour une discussion de la question en gravité quantique avec un focus épistémologique et Le Bihan à paraître~a pour une clarification du problème ontologique).

De même, le « *problème difficile du temps* », par analogie avec les problèmes difficiles de la *conscience* et de *l'espace-temps*, exploite l'existence d'un fossé explicatif entre une théorie temporelle et une théorie atemporelle. Le vocabulaire temporel est profondément enraciné dans notre appareil conceptuel, et il est loin d'être clair comment nous devons considérer la référence de ce vocabulaire, métaphysiquement parlant, si le temps n'est pas fondamentalement réel. Ce qui importe ici, c'est que, même si nous parvenons à résoudre le problème « facile » en proposant une dérivation de la relativité générale et de la théorie quantique des champs à partir de la nouvelle théorie, il faudra encore combler une lacune~: pourquoi une théorie temporelle fonctionne-t-elle si bien comme une

approximation d'une théorie atemporelle ? Comme pour les problèmes difficiles de la *conscience* et de la *espace-temps*, je suggère de diviser les réponses possibles au problème difficile du temps en trois catégories : la *dualisme* – que pour une raison qui deviendra claire, j'appellerai la *thèse du temps dérivé* – le *réductionnisme* et l'*éliminativisme*.

Le dualisme est l'idée que la *structure atemporelle fondamentale* et la *structure temporelle dérivée* sont toutes deux réelles. Le terme « dualisme » implique l'existence de deux catégories d'entités, mais il ne dit pas grand-chose sur la relation qui existe entre les deux catégories d'entités. En particulier, il ne dit pas si un ensemble d'entités est *plus fondamentale* que l'autre. L'idée, ici, est que la structure décrite par une future théorie de la gravité quantique, ainsi que les entités dont cette structure est faite, sont plus fondamentales que les structures et que les entités décrites par RG et par la théorie quantique des champs. C'est pourquoi je ferai référence à cette théorie sous le nom de « thèse du temps dérivé ». Selon la *thèse du temps dérivé* (voir Wüthrich 2012b, 2017 pour des remarques dans cette direction) le temps existe, mais de façon dérivée²⁶. La thèse temporelle dérivée exige de postuler trois choses~: premièrement, des couches de réalité (c'est-à-dire des niveaux ontologiques par opposition à des niveaux simplement descriptifs, épistémologiques), deuxièmement, une connexion ontologique indépendante de l'esprit entre les entités constituant ces niveaux de réalité, troisièmement, une relation de plus grande fundamentalité venant connecter les entités constituant ces niveaux. Cette relation de fundamentalité peut être primitive ou définie par rapport à une autre notion, par exemple une relation de fondation, ou une relation de construction (voir Bennet 2017).

Selon la *thèse réductionniste* (Le Bihan 2018), les entités temporelles et atemporelles sont tout aussi réelles~; cependant, cela n'implique pas – *en opposition* à la thèse du temps dérivé – que la réalité est stratifiée en niveaux ontologiques, le niveau temporel étant moins fondamental que le niveau atemporel. Les entités temporelles, ou plus précisément pour cette question, les entités spatio-temporelles, peuvent être considérées comme étant littéralement *composées d'entités non-spatio-temporelles* en utilisant la notion de *composition logique* telle qu'elle est introduite par Paul (2002, 2012). La notion de composition logique a été introduite afin de formuler l'idée que les objets matériels (comme les chaises) sont littéralement composés de leurs propriétés (par exemple, leurs couleurs, leurs formes et leurs localisations primitives). Cela montre qu'il est concevable d'appréhender le monde naturel comme étant structuré de diverses catégories métaphysiques, et que la composition ne doit pas nécessairement relier des entités qui relèvent de la même catégorie métaphysique. L'approche réductionniste ne souscrit pas à cette théorie méréologique du faisceau

26 Wüthrich va même jusqu'à défendre le fait que les courbes temporelles fermées (*closed timelike curves*) pourraient être exclues au niveau fondamental tout en existant néanmoins à un niveau dérivé (Wüthrich à paraître).

(une théorie incompatible avec l'affirmation selon laquelle les localisations spatiales ou spatio-temporelles sont des propriétés primitives fondamentales²⁷), mais elle exploite l'idée que les tous et leurs parties ne relèvent pas nécessairement de la même catégorie métaphysique. La manière dont nous devrions analyser le domaine temporel et le domaine non-temporel en termes de catégories métaphysiques n'est pas claire, mais le fait est que, quelle qu'en soit l'analyse pertinente, nous pouvons appréhender le dispositif de connexion entre les deux domaines comme une sorte de composition. Tout comme la thèse dérivée de l'espace-temps, la thèse réductionniste reconnaît l'existence d'entités temporelles et d'entités atemporelles. Et elle postule l'existence d'une relation indépendante de l'esprit entre les deux types d'entités.

Par conséquent, la différence entre la thèse dérivée et la thèse réductionniste est que la première affirme que la notion de composition ne peut pas rendre compte de l'émergence de l'espace-temps, alors que la seconde identifie l'émergence de l'espace-temps avec un cas particulier de composition, en soulignant que la composition ne doit pas nécessairement être spatio-temporelle par nature. La thèse réductionniste, en choisissant la composition logique comme notion primitive pour relier le spatio-temporel au non-spatio-temporel, évite l'anti-réductionnisme ontologique, à savoir la stratification de la réalité en niveaux ontologiques.

Qu'en est-il de *l'éliminativisme temporel*? Selon l'éliminativisme, seule la structure décrite par la théorie fondamentale existe. L'espace-temps n'est pas fondamentalement réel car il n'existe pas *simpliciter*. Dans le cadre de cette ontologie, il n'y a pas besoin de niveaux de réalité, de dispositifs de connexion trans-niveaux et de relations comparatives de fundamentalité. Bien que cette approche puisse sembler métaphysiquement attrayante, elle rend le problème de la cohérence empirique (Huggett et Wüthrich 2013) plus pressant en niant que les éléments de confirmation empirique (*evidence*) justifiant nos théories sont localisées dans un espace-temps qui n'est pas fondamental. Wüthrich attire notre attention sur ce point lorsqu'il écrit :

[C'est] une condition nécessaire pour toute science empirique d'être en mesure, au moins en principe, de mesurer ou d'observer quelque chose à *un endroit et à un moment donnés*. Cette locution en italique, à son tour, semble présupposer l'existence de l'espace et du temps. Si cette existence est maintenant niée dans les théories quantiques de la gravité, on pourrait alors craindre que ces théories soient contraintes de dire adieu à l'idée même de science empirique. Il devient donc primordial pour les partisans de ces

27 Pour une présentation et une discussion des théories métréologiques du faisceau en français, cf. Le Bihan (à paraître-b).

théories de montrer que celles-ci ne menacent que la fundamentalité, mais pas l'existence de l'espace et du temps. (Wüthrich 2017, 298)

Je considère que ces trois options sont exhaustives~: l'émergence du temps signifie que le temps existe de manière dérivée, de manière réductrice ou qu'il n'existe tout simplement pas²⁸. Je ne prendrai pas position sur ces interprétations possibles ici et j'examinerai plutôt leurs conséquences respective à l'égard de l'existence dans le temps²⁹.

Les conséquences de l'éliminativisme pour l'existence dans le temps sont évidentes~: la thèse implique un éternalisme standard dans le cas de l'approche des champs bidimensionnels de TC et un éternalisme atemporel dans le cas de GQB. Toutefois, la possibilité que le temps émerge dans le sens d'une réalité dérivée ou réductible nous amène à une nouvelle question~: se pourrait-il que l'une des thèses classiques sur l'existence dans le temps soit correcte au niveau macroscopique mais non au niveau fondamental~?

7. Des thèses réalistes à l'éternalisme

Dans cette section, je soutiens que si l'une ou l'autre de la thèse du temps dérivé ou de la thèse réductionniste du temps est l'interprétation correcte de l'émergence du temps, alors l'éternalisme (standard ou atemporel) est vrai. Lorsque nous acceptons que l'émergence du temps

28 Expliquer l'émergence en termes de réduction pourrait surprendre le lecteur principalement formé à la philosophie de l'esprit ou à la philosophie de l'émergence car l'émergence est souvent définie négativement comme une impossibilité de réduire un cadre terminologique à un autre. Mais notez qu'en physique et en philosophie de la physique, il est courant de considérer l'émergence et la réduction comme des vues compatibles puisque l'émergence est une notion plus large (voir par exemple Butterfield 2011).

29 Braddon-Mitchell et Miller (2019) ont récemment affirmé que seule l'interprétation éliminativiste de l'émergence du temps mérite une discussion philosophique. Ils écrivent~: « Faisons la distinction entre ce que nous appelons les théories faiblement atemporelles et les théories fortement atemporelles. Les théories faiblement atemporelles sont des théories dans lesquelles, bien qu'il n'y ait pas de temps au niveau fondamental, le temps, ou quelque chose de très temporel, émerge à un niveau macroscopique. [...] Dans ce qui suit, nous ne nous intéresserons pas aux théories faiblement atemporelles car bien qu'il soit intéressant de découvrir que le temps est émergent plutôt que fondamental, aucun problème philosophique particulier ne découle de ces théories, et il n'est pas vraiment clair qu'il soit approprié de qualifier ces théories d'atemporelles » (Braddon-Mitchell et Miller 2019, 1808). Leur revendication est déroutante. Ils considèrent uniquement l'émergence possible du temps au sein d'une théorie physique particulière et ne considèrent pas l'émergence d'une théorie physique temporelle à partir d'une autre théorie physique distincte et atemporelle. Expliquer comment une telle émergence est possible constitue à mon sens une question philosophique très intéressante.

doit être interprétée selon une image stratifiée, le temps étant réel de manière dérivée ou réduite, comment devons-nous comprendre le débat sur l'existence dans le temps~? Pour commencer, selon le réalisme temporel (à savoir la disjonction de la thèse du temps dérivé et de la thèse réductionniste), *la structure fondamentale*³⁰ *non-spatio-temporelles et la structure spatio-temporelles sont toutes deux réelles*. Cette approche suscite deux questions.

Premièrement, l'« ontologie fondamentale » est-elle présentiste, éternaliste ou non-futuriste~? Comme je l'ai soutenu dans la section précédente, d'après GQB et TC, la structure fondamentale doit être interprétée comme étant éternaliste. Deuxièmement, la structure temporelle réelle (dérivée ou réduite) pourrait-elle se voir décrite correctement par le présentisme, le non-futurisme ou l'éternalisme~? En d'autres termes, se pourrait-il que, bien que le monde soit, disons, atemporellement éternaliste à l'échelle fondamentale de description, le monde puisse afficher à d'autres échelles – et en particulier à notre échelle macroscopique – une ontologie temporelle différente comme le présentisme, le non-futurisme ou l'éternalisme standard~? Face à cette question, on peut faire valoir qu'il serait quelque peu étrange de prétendre que *différentes ontologies temporelles* pourraient valoir à *différents niveaux de réalité*. Si l'éternalisme standard ou atemporel est vrai au niveau basique de description, c'est-à-dire celui qui est décrit avec précision par une théorie quantique de la gravité, il devrait peut-être en aller de même aux niveaux supérieurs de description. En d'autres termes, le monde naturel devrait satisfaire, pourrait-on dire, à un *principe d'homogénéité métaphysique trans-niveaux*. Selon ce principe, l'ontologie doit être la même à tous les niveaux de description~: les entités doivent relever des mêmes catégories métaphysiques primitives et satisfaire aux mêmes principes métaphysiques. Par exemple, si les propriétés sont *universelles*, alors les propriétés sont universelles à tous les niveaux ontologiques, au niveau fondamental mais aussi à tout autre niveau. Les propriétés ne deviennent pas soudainement, à une échelle particulière de description, des *tropes* ou des *classes d'objets*. Ou, pour prendre un autre exemple, si l'ontologie fondamentale est une ontologie d'*objets*, alors l'ontologie dérivée ne peut pas être une ontologie de *faits*. Si l'homogénéité métaphysique trans-niveaux est vraie en général, alors elle l'est en particulier pour l'existence dans le temps. Un tel principe est *prima facie* attrayant en étant fondé sur des considérations de *parcimonie ontologique*~: pourquoi multiplier les ontologies dans le monde réel s'il

30 Pour faciliter la présentation, dans ce qui suit, j'utiliserai l'expression « ontologie fondamentale » et ferai référence à des entités plus fondamentales que d'autres entités, en supposant que le mot « fondamental » doit être interprété différemment selon que nous opérons avec l'hypothèse de la thèse du temps dérivé (nous avons alors une notion de fondamentalité qui n'est pas identique à la composition méréologique) ou du réductionnisme temporel (la relation de plus grande fondamentalité n'est alors que la relation de méréologie non-spatio-temporelle de composition).

est possible de répondre aux questions philosophiques avec la même ontologie à tous les niveaux de description~?

Cependant, il me semble que ce type de raisonnement devrait être abandonnée pour au moins trois raisons. Premièrement, ce principe est déjà remis en cause par la thèse du temps dérivé~: par définition, le temps (ou, plus précisément, l'espace-temps) est réel au niveau dérivé mais pas au niveau fondamental. Par conséquent, opérer sous l'hypothèse de la thèse du temps dérivé constitue déjà une dérogation au principe de l'homogénéité métaphysique trans-niveaux. En d'autres termes, souscrire à la thèse du temps dérivé revient à ouvrir la boîte de Pandore en rejetant l'universalité de l'homogénéité métaphysique – ce qui compromet la possibilité de l'utiliser aveuglément comme principe directeur méthodologique systématique.

Deuxièmement, il est tout simplement possible de soutenir que l'on ne partage pas cette intuition en souscrivant à un pluralisme ontologique selon lequel l'ontologie n'est pas la même aux diverses échelles de description. Cette manœuvre est d'ailleurs assez courante lorsqu'il s'agit de défendre une forme d'anti-réductionnisme théorique à l'égard des sciences spéciales telles que la biologie moléculaire ou la chimie quantique, fondé dans un certain anti-réductionnisme ontologique, à savoir la conjonction du pluralisme ontologique et d'une indexation des différentes ontologies aux diverses échelles de description. Et si, dans ce cas, les différences à propos de ce qui existe génèrent des classes de faits contradictoires à propos de ce qui existe (nous en discuterons plus en détail ci-dessous), il convient de noter que cette idée selon laquelle le monde est constitué de faits contradictoires constituant des *fragments temporels* (cf. Fine 2005) ou des *fragments duels* (voir Le Bihan et Read, section 5) a été avancée à plusieurs reprises.

Troisièmement, les *intuitions basées sur la seule expérience phénoménologique ne peuvent justifier aucune revendication philosophique sur l'ontologie des échelles qui restent hors de portée phénoménologique*. Nos intuitions phénoménales sont en effet conditionnées par un cadre particulier, à savoir un niveau N^* particulier, et il serait prématuré d'étendre l'ontologie de N^* à tous les niveaux N sur cette seule base. Pour le dire de façon imagée, nous avons peut-être évolué dans une ontologie monochrome qui n'est pas représentative de la richesse colorée des systèmes ontologiques distincts constituant la réalité – et existant à différents niveaux ontologiques.

Pour ces trois raisons, nous devons examiner attentivement la possibilité d'une *fragmentation d'échelle*, à savoir que différentes ontologies pourraient exister à différentes échelles de description, comme moyen de combiner la non-existence du temps au niveau fondamental avec l'une des trois ontologies temporelles à l'échelle humaine.

Je vais maintenant présenter un argument spécifique contre le fragmentalisme d'échelle *pour le cas particulier de l'ontologie temporelle*. Supposons que l'éternalisme atemporel décrit adéquatement la structure fondamentale, mais pas les niveaux supérieurs. L'ontologie de niveau supérieur est saisie par l'une des trois autres thèses~: le présentisme, le non-futurisme ou l'éternalisme standard. Le fragmentalisme d'échelle entraîne une indexation de l'existence *simpliciter* à des niveaux particuliers. En d'autres termes, l'existence *simpliciter* devient relative à des niveaux, et il n'y a pas d'existence *simpliciter simpliciter*. Par rapport à un niveau ontologique particulier, la gamme de ce qui existe *simpliciter* est différente (ou peut être différente) de la gamme de ce qui existe *simpliciter* par rapport aux autres niveaux. Il s'agit donc ici de restreindre la notion d'existence *simpliciter* à des niveaux. L'existence *simpliciter* est l'existence *simpliciter* par rapport à un niveau particulier. Il convient donc de distinguer deux types d'existence *simpliciter*~: l'existence *simpliciter* relative (l'existence *simpliciter* à un niveau ontologique particulier) et l'existence *simpliciter* universelle (l'existence *simpliciter* trans-niveaux). Dans la théorie qui en résulte, l'existence *simpliciter* relative (c'est-à-dire l'existence temporelle) peut varier en portée d'un niveau à l'autre.

Prenons un exemple historique~: l'événement E de César traversant le Rubicon. Cet événement E est considéré comme existant dans le passé à partir de notre perspective du XXI^e siècle. D'après le présentisme, E n'existe pas *simpliciter*. Or, selon la thèse du temps dérivé, cela ne peut être vrai qu'au niveau dérivé et le présentisme doit être réinterprété comme la thèse selon laquelle E n'existe pas *simpliciter relativement au niveau supérieur*. Toutefois, dans le contexte de l'émergence du temps, E peut être rattaché à – c'est-à-dire associé à – une partie propre de la structure fondamentale non-spatio-temporelle. Or, la base de E dans la structure fondamentale existe *simpliciter*, relativement à toute perspective au sein de la structure fondamentale, puisque l'éternalisme atemporel décrit adéquatement la structure fondamentale. Par conséquent, le partisan du présentisme dérivé peut soutenir qu'il est à la fois vrai que E *existe simpliciter* et que E *n'existe pas simpliciter*. Bien que l'entité servant de fondation existe atemporellement du point de vue de la structure fondamentale, l'entité fondée par l'entité servant de fondation n'existe pas *simpliciter* du point de vue de la structure dérivée. Cette ligne de pensée relationniste (l'existence *simpliciter* est indexée sur des niveaux) semble ainsi offrir une échappatoire aux présentistes et aux non-futuristes.

Cependant, cette approche a pour conséquence désagréable de relativiser l'existence *simpliciter* à des niveaux, détruisant la possibilité de décrire ce qu'il y a de manière *absolue*. Il n'y a donc pas de réponse définitive à la question de savoir si César existe *simpliciter* puisque, dans ce tableau, les faits existentiels doivent être relativisés à des échelles de description. En outre, un cadre théorique aussi lourd (qui exige de souscrire à la thèse du temps dérivé contre le réductionnisme),

en introduisant un si grand nombre de dispositifs ontologiques – des niveaux ontologiques, des ontologies distinctes indexées à ces niveaux et des faits existentiels relativisés à ces niveaux – semble peu motivé. Bien que le fragmentalisme d'échelle permette, logiquement parlant, de défendre le présentisme dérivé ou le non-futurisme dérivé – des thèses très faibles puisqu'elles concèdent qu'elles ne s'appliquent pas au niveau fondamental – cela ne peut se faire qu'au coût prohibitif de la souscription à des revendications ontologiques radicales. Ainsi, la seule chose que les partisans du présentisme et du non-futurisme peuvent faire est de souscrire à des thèses affaiblies à partir de leur point de vue original pour un coût énorme. Par conséquent, il est raisonnable de supposer que l'existence *simpliciter* ne dépend pas des échelles de description, avec l'implication que *les interprétations réalistes de l'émergence du temps (la thèse du temps dérivé et le réductionnisme) impliquent aussi un éternalisme standard ou atemporel.*

8. Conclusion

La non-fondamentalité du temps telle qu'on la rencontre dans la gravité quantique à boucles et dans la théorie des cordes, qu'elle soit interprétée de manière éliminativiste ou à travers le prisme d'un certain réalisme, implique l'éternalisme. Par conséquent, la dispute entre le présentisme, le non-futurisme et l'éternalisme pourrait bien être tranchée empiriquement en faveur de l'éternalisme standard, avec l'approche des champs bidimensionnels de la théorie des cordes, ou de l'éternalisme atemporel, avec la gravité quantique à boucles.

Remerciements

Pour leurs commentaires très utiles sur une version antérieure de cet essai, mes remerciements vont à Jiri Benovsky, Annabel Colas, Alberto Corti, Claudio Calosi, Fabrice Correia, Tiziano Ferrando, Vincent Grandjean, Rasmus Jakslund, Niels Linnemann, Cristian Mariani, Keizo Matsubara, Robert Michel ainsi qu'à deux deux évaluateurs anonymes. Je remercie spécialement Nick Huggett et Christian Wüthrich pour leurs commentaires inestimables. Ce travail a été produit avec le soutien du Fonds national suisse de la recherche scientifique.

Références :

David John Baker : Does string theory posit extended simples? *Philosopher's Imprint*, 16(18), 2016.

Julian Barbour : *The end of time: The next revolution in physics*. Oxford University Press, 2001.

Sam Baron : The curious case of spacetime emergence. *Philosophical Studies*, pages1-20, 2019.

Sam Baron, Peter Evans et Kristie Miller : From timeless physical theory to timelessness. *Humana Mente*, 59:35-59, 2010.

Karen Bennett : *Making Things Up*. Oxford University Press, 2017.

Jiri Benovsky : From experience to metaphysics: On experience-based intuitions and their role in metaphysics. *Noûs*, 49(4):684-697, 2015.

John Bigelow : Presentism and properties. *Philosophical Perspectives*, 10:35-52, 1996.

Craig Bourne : *A Future for Presentism*. Oxford University Press, 2006.

David Braddon-Mitchell et Kristie Miller : Quantum gravity, timelessness, and the contents of thought. *Philosophical Studies*, 176(7):1807-1829, 2019.

Phillip Bricker : Island universes and the analysis of modality. In Gerard Preyer et Frank Siebelt, éditeurs : *Reality and Humean Supervenience: Essays on the Philosophy of David Lewis*, pages 27-55. Rowman and Littleeld Lanham, 2001.

Charlie Dunbar Broad : *Scientific Thought*. Routledge & Kegan Paul London, 1923.

Jeremy Butterfield : The end of time? *British Journal for the Philosophy of Science*, 53(2):289-330, 2002.

Jeremy Butterfield : Less is different: Emergence and reduction reconciled. *Foundations of Physics*, 41(6):1065-1135, 2011.

Jeremy Butterfield : On dualities and equivalences between physical theories. In Christian Wüthrich, Baptiste Le Bihan et Nick Huggett, éditeurs : *Philosophy Beyond Spacetime*. Oxford University Press, à paraître. URL <https://arxiv.org/abs/1806.01505>.

Tim Button : There's no time like the present. *Analysis*, 66(290):130-135, 2006.

Tim Button : Every now and then, no-futurism faces no sceptical problems. *Analysis*, 67(4):325-332, 2007.

Craig Callender : *What Makes Time Special?* Oxford University Press, 2017.

Craig Callender et Nick Huggett : *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale: Contemporary Theories in Quantum Gravity*. Cambridge University Press, 2001.

Claudio Calosi et Matteo Morganti : Interpreting quantum entanglement: Steps towards coherentist quantum mechanics. *British Journal for the Philosophy of Science*, à paraître.

William Lane Craig : *Time and the Metaphysics of Relativity*. Kluwer Academic, 2001.

Thomas Crisp : On presentism and triviality. *Oxford Studies in Metaphysics*, 1:15-20, 2004.

Daniel Deasy : What is presentism? *Noûs*, 51(2):378-397, 2017.

Mauro Dorato : The irrelevance of the presentist/eternalist debate for the ontology of Minkowski spacetime. *Philosophy and Foundations of Physics*, 1:93-109, 2006.

Fay Dowker : Causal sets as discrete spacetime. *Contemporary Physics*, 47(1):1-9, 2006.

Fay Dowker : The birth of spacetime atoms as the passage of time. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1326(1):18-25, 2014.

John Earman : Reassessing the prospects for a growing block model of the universe. *International Studies in the Philosophy of Science*, 22(2):135-164, 2008.

Kit Fine : Tense and reality. In Kit Fine, éditeur : *Modality and Tense*, pages 261-320. Oxford University Press, 2005.

Akiko Frischhut : What experience cannot teach us about time. *Topoi*, 34(1):143-155, 2015.

Henrique Gomes, Sean Gryb et Tim Koslowski : Einstein gravity as a 3d conformally invariant theory. *Classical and Quantum Gravity*, 28(4):045005, 2011.

Richard Healey : Can physics coherently deny the reality of time? *Royal Institute of Philosophy Supplements*, 50:293-316, 2002.

Richard Healey : The measurement problem for emergent spacetime in loop quantum gravity. In Christian Wüthrich, Baptiste Le Bihan et Nick Huggett, éditeurs : *Philosophy Beyond Spacetime*. Oxford University Press, à paraître.

Nick Huggett : Skeptical notes on a physics of passage. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1326:9-17, 2014.

Nick Huggett : Target space \neq space. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 59:81-88, 2017.

Nick Huggett et Tiziana Vistarini : Deriving general relativity from string theory. *Philosophy of Science*, 82(5):1163-1174, 2015.

Nick Huggett, Tiziana Vistarini et Christian Wüthrich : Time in quantum gravity. *A Companion to the Philosophy of Time*, pages 242-261, 2013.

Nick Huggett et Christian Wüthrich : 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, 2013.

Nick Huggett et Christian Wüthrich : *Out of Nowhere: The Emergence of Spacetime in Quantum Theories of Gravity*. Oxford University Press, à paraître.

Jenann Ismael et Jonathan Schaffer : Quantum holism: nonseparability as common ground. *Synthese*, pages 1-30, 2016.

Vincent Lam et Christian Wüthrich : Spacetime is as spacetime does. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 64:39-51, 2018.

Baptiste Le Bihan : Un espace-temps de contingences. Thèse de doctorat, Rennes 1, 2015a.

Baptiste Le Bihan : The unrealities of time. *Dialogue*, 54(1):25-44, 2015b.

Baptiste Le Bihan : Priority monism beyond spacetime. *Metaphysica*, 19(1):95-111, 2018a.

Baptiste Le Bihan : Space emergence in contemporary physics: Why we do not need fundamentality, layers of reality and emergence. *Disputatio*, 10(49):71-95, 2018b.

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

Baptiste Le Bihan : Spacetime emergence in quantum gravity: Functionalism and the hard problem. *Synthese*, à paraître a.

Baptiste Le Bihan : Les théories méreologiques du faisceau. In Dominique Berlioz, Filipe Drapeau Contim et Francois Loth, éditeurs : *Metaphysique et ontologie*. Paris : Vrin, à paraître b.

Baptiste Le Bihan et Niels Linnemann : Have we lost spacetime on the way? Narrowing the gap between general relativity and quantum gravity. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 65:112-121, 2019.

Baptiste Le Bihan et James Read : Duality and ontology. *Philosophy Compass*, page e12555, 2018.

Fotini Markopoulou et Lee Smolin : Disordered locality in loop quantum gravity states. *Classical and Quantum Gravity*, 24(15):3813, 2007.

Ned Markosian : A defense of presentism. *Oxford Studies in Metaphysics*, 1(3):47-82, 2004.

Keizo Matsubara : Quantum gravity and the nature of space and time. *Philosophy Compass*, 12(3):e12405, 2017.

Tim Maudlin : Completeness, supervenience and ontology. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 40(12):3151, 2007.

Kerry McKenzie : The 'philosopher's stone': physics, metaphysics, and the value of a final theory. In Christian Wüthrich, Baptiste Le Bihan et Nick Huggett, éditeurs : *Philosophy Beyond Spacetime*. Oxford University Press, à paraître.

Hugh Mellor : *Real Time II*. Routledge, 1998.

Bradley Monton : Presentism and quantum gravity. *Philosophy and Foundations of Physics*, 1:263-280, 2006.

Thomas V. Morris : *Our Idea of God: An Introduction to Philosophical Theology*. Intervarsity Press, 1991.

Ioan Muntean : Metaphysics from string theory: S-dualities, fundamentality, modality and pluralism. In T. Bigaj et C. Wüthrich, éditeurs : *Metaphysics in Contemporary Physics*, pages 259-292. Brill/Rodopi, 2015.

Joshua Norton : Loop quantum ontology: spin-networks and spacetime. 2015. URL <http://philsci-archive.pitt.edu/12016/>. Manuscript.

Joshua Norton : Incubating a future metaphysics: quantum gravity. *Synthese*, pages 1-22, 2017.

Laurie A. Paul : Logical parts. *Noûs*, 36(4):578-596, 2002.

Laurie A. Paul : Temporal experience. *The Journal of Philosophy*, 107(7):333-359, 2010.

Laurie A. Paul : Building the world from its fundamental constituents. *Philosophical Studies*, 158(2):221-256, 2012.

David P Rideout et Rafael D Sorkin : Classical sequential growth dynamics for causal sets. *Physical Review D*, 61(2):024002, 1999.

Carlo Rovelli : *Quantum Gravity*. Cambridge University Press, 2004.

Carlo Rovelli et Francesca Vidotto : *Covariant Loop Quantum Gravity: An Elementary Introduction to Quantum Gravity and Spinfoam Theory*. Cambridge University Press, 2014.

Theodore Sider : *Four-Dimensionalism: An Ontology of Persistence and Time*. Oxford University Press, 2001.

J. J. C. Smart : *Philosophy And Scientific Realism*. Humanities Press, 1963.

Chris Smeenk : Time in cosmology. In Heather Dyke et Adrian Bardon, éditeurs : *A Companion to the Philosophy of Time*, pages 201-219. Wiley, 2013.

Michael Tooley : *Time, Tense, and Causation*. Oxford University Press, 2000.

Edward Witten : Reflections on the fate of spacetime. *Physics Today*, 49(4):24-31, 1996.

Christian Wüthrich : No presentism in quantum gravity. In Vesselin Petkov, éditeur : *Space, Time, and Spacetime*, pages 257-278. Springer, 2010.

Christian Wüthrich : Demarcating presentism. In *EPSA Philosophy of Science: Amsterdam 2009*, pages 441-450. Springer, 2012a.

Christian Wüthrich : The structure of causal sets. *Journal for General Philosophy of Science*, 43(2):223-241, 2012b.

Christian Wüthrich : The fate of presentism in modern physics. In Robert Ciuni, Kristie Miller et Giuliano Torrenço, éditeurs : *New Papers on The Present: Focus On Presentism*, pages 91-131. Philosophia Verlag, Munich, 2013.

Christian Wüthrich : Raiders of the lost spacetime. In Dennis Lehmkuhl, Gregor Schiemann et Erhard Scholz, éditeurs : *Towards a Theory of Spacetime Theories*, pages 297-335. Springer, 2017.

Christian Wüthrich : Time travelling in emergent spacetime. In Judit Madarasz et Gergely Szekely, éditeurs : *Hajnal Andreka and Istvan Nemeti on the Unity of Science: From Computing to Relativity Theory Through Algebraic Logic*. Springer, à paraître.

Christian Wüthrich et Craig Callender : What becomes of a causal set? *The British Journal for the Philosophy of Science*, 68(3):907-925, 2016.