

Chapitre 10 – A la recherche de l'espace-temps perdu : questions philosophiques concernant la gravité quantique – Christian

Wüthrich

Traduit de l'anglais par Soazig Le Bihan

La physique théorique se voit de nos jours confrontée à un défi qui n'est pas sans rappeler celui auquel faisaient face les prédécesseurs de Newton au 17^e siècle : deux théories incompatibles décrivent avec succès deux domaines séparés parmi les phénomènes observables. Les lois de la mécanique quantique gouvernent les phénomènes de petite échelle de la physique des particules, tandis que les lois de la relativité générale (RG) régissent la structure de l'univers à grande échelle. Le défi que la gravité quantique se doit de relever est d'achever la révolution qui a eu lieu en physique au siècle dernier ; la tâche ne consiste en rien moins que de fusionner les deux cadres théoriques incommensurables que sont la physique quantique et la RG. Nombreux sont ceux parmi les protagonistes de cette initiative qui espèrent qu'en relevant ce défi, un pas important, sinon final, sera fait vers l'unification théorique de la physique fondamentale. Attirés plus que jamais aujourd'hui par cette tâche herculéenne, les physiciens se ruent, creusant le sol, à la recherche d'une mine d'or menant au Saint Graal. De leurs efforts est née une variété d'approches, de techniques et de théories, parmi lesquelles deux sont proéminentes : la théorie des cordes et la gravitation quantique à boucles (GQB). Malgré des développements pour le moins palpitants du côté de la physique, les philosophes se sont montrés particulièrement lents à confronter les ressources conceptuelle et philosophique des richesses qui ont été déterrées à cette occasion.

Cet article se veut un appel aux armes et a pour but de mettre l'eau à la bouche aux lecteurs, en exposant certains des casse-têtes philosophiques les plus captivants qui se présentent en gravité quantique. L'analyse sera préfacée, en première section,

par des considérations générales quant à la nécessité de trouver une théorie quantique de la gravité et aux méthodes employées dans la poursuite de ce but. Après avoir cartographié le domaine en Section 2, je présenterai la GQB comme une candidate compétitive et particulièrement riche en problèmes philosophiques en Section 3. Ce qu'on appelle le problème du temps, i.e. le casse-tête consistant en ce que les quantités physiques ne peuvent jamais véritablement changer, est traité en Section 4. Enfin, en Section 5 est analysé comment l'espace-temps continu qui nous est familier pourrait ré-émerger de la structure fondamentale non spatiotemporelle de l'univers.

1. Pourquoi la gravité quantique ?

Avant de nous embarquer dans l'étude des fondements de la gravité quantique, il nous faut nous convaincre qu'une théorie de la gravité quantique est, de fait, nécessaire. Appelons *théorie quantique de la gravité* toute théorie cohérente qui combine la gravité avec une description quantique de la matière. Il est important de noter qu'il n'est pas nécessaire que la théorie en question considère la gravité elle-même comme quantifiée. Il est tout à fait acceptable qu'une telle théorie marie une conception classique de la gravité avec une conception quantique de la matière. Ajoutons cependant une importante exigence méthodologique : une théorie quantique de la gravité se doit d'avoir des « limites convenables », c'est-à-dire qu'aux échelles pour lesquelles il n'est plus pertinent de prendre en compte la nature quantique de la matière, la théorie se doit de fusionner avec la RG, et pour les régimes où la gravité est faible, elle se doit de se transformer en une théorie quantique adéquate.²⁰²

Mais pourquoi la physique aurait-elle besoin d'une théorie quantique de la gravité? La réponse commune à cette question peut être analysée comme une combinaison de trois (groupes d') arguments. Premièrement, il est souvent avancé qu'une telle théorie est nécessaire pour satisfaire une exigence d'*unification*. L'exigence

²⁰² Plus précisément, elle se doit de se transformer en théorie quantique des champs définie sur l'espace-temps de Minkowski caractéristique de la relativité restreinte.

d'unification est devenue pour beaucoup une exigence méthodologiquement importante du fait du succès que son application a permis à la physique de rencontrer dans le passé. James Clerk Maxwell forgea l'unification des forces magnétiques et électriques avec sa théorie dynamique de l'électromagnétisme dans les années 1870. Dans les années soixante, Abdus Salam, Sheldon Glashow, et Steven Weinberg formulèrent la théorie électrofaible, unifiant ainsi l'électrodynamique et l'interaction nucléaire faible associée à la radioactivité. Par la suite, la chromodynamique quantique, décrivant l'interaction nucléaire forte, qui est responsable de la cohésion des noyaux des atomes et de leurs constituants, et la théorie électrofaible furent unifiées à leur tour au sein du modèle standard de la physique des particules, qui parvient à rendre compte de trois des quatre forces fondamentales. Bien naturelle est ainsi l'ambition d'unifier les théories quantiques du modèle standard avec la RG – la meilleure théorie qu'on ait actuellement de la dernière des forces, la gravité. Notons cependant que si cette vénérable histoire justifie que l'unification soit prise comme desideratum méthodologique – et, dans une certaine mesure, comme programme de recherche, elle ne justifie en rien qu'on en fasse un dogme métaphysique. Le succès du processus d'unification dans le passé n'implique pas que la nature soit elle-même suffisamment unifiée pour pouvoir faire l'objet d'une théorie fondamentale unique qui sous-tendrait toute la physique. Il est en effet parfaitement concevable que la nature soit multiple au sens où la gravité résiste à toute subsomption sous l'ombrelle quantique de la physique des particules.

Le deuxième argument se nourrit des théorèmes sur les singularités, démontrés dans les années soixante et soixante dix par Stephen Hawking, Roger Penrose, et Robert Geroch, et qui établissent de façon solide que les singularités sont génériques en RG classique. De nombreux auteurs ont soutenu que la RG cesse « là » ou « alors » d'être valide et que, par conséquent, elle contient les graines de sa propre destruction. Du coup, si on poursuit cet argument, il nous faut une théorie de remplacement pour la gravité et on a toutes les raisons de s'attendre à ce qu'une telle théorie soit quantique. En particulier, certains pensent que procéder à la quantification de la gravité, i.e. décrire la gravité comme possédant elle-même une

nature quantique, permet de dissoudre certaines singularités comme le big bang. Cet argument n'a cependant, du moins en lui-même, pas beaucoup de force. En RG, les singularités ne font pas partie du tissu spatio-temporel, c'est-à-dire qu'elles ne se « trouvent » pas « en un lieu » particulier, et donc il n'est aucun besoin d'avoir une théorie valide « là » ou « alors ». La RG est une théorie parfaitement cohérente dans son domaine d'application, et par conséquent il est faux de dire qu'elle contient les graines de sa propre destruction. Ou du moins, si graines il y a, elles ne sauraient porter aucun fruit dialectique sans qu'on y ajoute une quantité considérable d'engrais argumentatif.

La troisième ligne d'argument, qui est de loin la plus convaincante, consiste à dire qu'il est des phénomènes dont nous avons de bonnes raisons de croire qu'ils présentent des aspects à la fois quantiques et gravitationnels, et que par conséquent, toute théorie qui rend compte de ces phénomènes de façon satisfaisante se doit d'intégrer ces deux éléments. Le plus important étant ici que parmi ces phénomènes comptent la dynamique des trous noirs et le commencement de l'univers. Insistons ici sur le fait que, bien que ces deux phénomènes soient liés à des singularités – dans leur description classique – ce n'est pas de là que vient la nécessité d'une théorie quantique de la gravité. C'est bien plutôt la présence simultanée de hautes densités de matière et d'un champ gravitationnel fort, tout ceci sur des échelles petites, qui impose une telle théorie. Au bout du compte, c'est bien l'existence de phénomènes plutôt extrêmes, et non un quelconque critère méthodologique ou esthétique, qui explique qu'on ait besoin d'une théorie de la gravité quantique.

Notons avant de conclure ici que, bien que quantifier la gravité – si tant est qu'on puisse le faire – permettrait clairement d'obtenir une théorie de la gravité quantique, ceci n'est en rien nécessaire. L'existence de régimes où les effets quantiques de la matière et les champs gravitationnels forts jouent conjointement un rôle important n'implique en rien que la gravité se doive d'être elle-même quantique. Tout ce dont on a besoin est une théorie qui gouverne l'« interaction » entre la matière quantique et la gravité qui pourrait rester classique. En d'autres

termes, rien de ce qui a été dit ici jusqu'à présent ne permet d'exclure les théories de la gravité dites « semi-classiques » de l'ensemble des théories adéquates possibles, même si ces théories violent les principes fondamentaux de la RG.

Maintenant que nous avons bien distingué la question de savoir si nous avons besoin d'une théorie quantique de la gravité de celle de savoir si la gravité doit être quantifiée, je me hâte d'ajouter qu'il existe de nombreux arguments qui ont pour but de montrer que la gravité doit être quantifiée dans toute théorie de la gravité quantique, et que donc les approches semi-classiques ne peuvent pas aboutir. Un des arguments typiques qui vont en ce sens consiste à tenter de faire entrer en contradiction d'un côté l'hypothèse d'une gravité de type classique interagissant avec la matière quantique et de l'autre un des principes physiques bien établis comme le principe de correspondance ou celui de la conservation de l'énergie. A ma connaissance cependant, il n'existe aucun argument de ce type qui ne fasse pas appel en plus à des prémisses que les défenseurs des approches semi-classiques ne sont nullement obligés d'accepter.²⁰³

Maintenant que nous sommes assurés de la nécessité de développer une théorie quantique de la gravité, venons-en à dessiner la carte des principales approches de la gravité quantique en compétition.

2. Cartographie du domaine : les différentes approches de la gravité quantique

Sur la base d'un schéma taxonomique bien utile, Chris Isham (1994) a proposé de diviser les différentes façons de formuler une théorie pleinement quantique, donc pas semi-classique, de la gravité en quatre types d'approche : premièrement, celles qui « quantisent » la RG ; deuxièmement, celles qui « relativisent » la physique quantique ; troisièmement, celles qui construisent une théorie quantique conventionnelle incluant la gravité et qui considèrent la RG comme sa limite aux basses énergies ; et quatrièmement, celles qui voient à la fois la RG et les théories

²⁰³ Cf. Callender et Huggett (2001), Huggett et Callender (2001), Mattingly (2006), et Wüthrich (2005).

quantiques conventionnelles comme les limites de basse énergie d'une théorie radicalement nouvelle. Considérons chacun de ces groupes l'un après l'autre.

La première famille d'approche prend pour point de départ la RG, and cherche à appliquer un procédé de « quantification » – autrement dit un recette générale pour concocter une théorie quantique conventionnelle à partir d'une théorie classique comme l'est la RG, ceci d'une façon qui soit à la fois en accord avec la rigueur mathématique et les principes de la physique. Evidemment, procéder à une quantification, c'est procéder pour ainsi dire « à l'envers », du point de vue métaphysique, puisque cela consiste à partir d'une théorie classique douteuse – en ce sens qu'elle est reconnue comme défectueuse et comme nécessitant, pour cette raison, remplacement – puis à tenter de construire l'édifice solide de la nouvelle théorie (quantique) de la gravité sur les ruines de l'ancienne. On doit cependant comprendre cette stratégie comme motivée par l'usage d'un moyen méthodologiquement prometteur de parvenir à certaines fins, un peu à la façon de l'échelle de Wittgenstein. Les procédés de quantification ont prouvé leur efficacité dans le passé, et ont permis de produire, dans d'autres domaines de la physique, d'importantes théories telles que l'électrodynamique quantique. Les partisans de ce type de stratégie espèrent pouvoir rencontrer un succès similaire en physique gravitationnelle.

Le première famille d'approche se divise en deux genres: l'Ansatz covariant, dont on peut dire qu'il git désormais sur son lit de mort,²⁰⁴ et l'approche, bien vigoureuse, elle, en termes de quantification canonique. Pour pouvoir procéder à une quantification canonique d'une théorie, il faut que celle-ci soit formulée dans un formalisme particulier, appelé le formalisme hamiltonien contraint. Nous discuterons plus bas de comment l'adaptation de la RG au moule d'un tel formalisme

²⁰⁴ Ceci parce que les quantifications covariantes de la RG ne sont pas renormalisables, un défaut qui est le plus souvent considéré comme fatal. Cela ne veut *pas* dire, cependant, que les techniques covariantes ne jouent aucun rôle dans la théorie de gravité quantique contemporaine.

se trouve au cœur des problèmes conceptuels les plus déroutants que rencontre cette théorie. La gravitation quantique à boucle (GQB) est la représentante la plus importante de cette approche, mais il y en a d'autres.

Concernant la seconde stratégie, il ne se dessine à ce jour aucune voie qui promette d'obtenir une théorie de la gravité quantique *complète* par « relativisation » des théories quantiques des champs, c'est-à-dire par l'emploi de techniques qui permettrait l'incorporation totale des leçons de la RG dans la théorie quantique. La seule représentante actuelle de cette approche consiste à tenter de formuler une théorie quantique des champs dans le cadre d'un espace-temps courbe, et non plat comme l'est l'espace-temps usuel. L'idée générale qui sous-tend cette approche est d'incorporer, en un sens local, le principe de covariance générale de la RG. Il est important de noter que, en revanche, l'espace-temps, tout courbé qu'il soit, n'est en rien dynamique. Autrement dit, il ne peut aucunement être interprété à la façon dont on interprète l'espace-temps de la RG, c'est-à-dire comme interagissant avec les champs de matière.

Le troisième groupe se place également dans la perspective de la physique quantique, mais au lieu d'essayer d'y incorporer directement les leçons de RG, tente de développer la physique quantique par des moyens aussi conventionnels que possible pour y intégrer la gravité. L'espoir est alors qu'on retrouvera la RG comme limite aux basses énergies de la théorie nouvelle. Le membre de loin le plus prometteur de ce groupe est la théorie des cordes, qui, cependant, va beaucoup plus loin que la théorie quantique des champs conventionnelle, tant du point de vue de ses méthodes que de celui de ses ambitions. Ceci dit, bien qu'elle fasse exploser les frontières naturelles du groupe, la théorie des cordes se place malgré tout dans la perspective de la théorie quantique des champs conventionnelle, ce autant du point de vue de son histoire que de celui de son système de pensée, contrairement aux tentatives de construction d'une nouvelle théorie de la gravité quantique qui serait séparée de la « vieille physique ». Encore une fois, il existe d'autres approches dans ce groupe, telles que la théorie quantique des champs topologique, mais aucune ne rassemble de soutien substantiel de la part des physiciens.

La meilleure façon de caractériser le quatrième et dernier groupe de la taxonomie de Isham est par son attitude iconoclaste. Les approches hétérodoxes de ce type ne prennent en effet aucun élément de théorie physique connue pour point de départ ; au lieu de cela, des points de vue radicalement nouveaux sont envisagés dans l'espoir de formuler une théorie de la gravité quantique *ab initio*. Pour autant que je sache, ces approches ne proposent à l'heure actuelle que des *schémas* programmatiques, et non des théories à part entière. Leur caractère attractif vient principalement de la redoutable apparence d'incompatibilité profonde entre les principes gouvernant la physique quantique des phénomènes à petite échelle et ceux gouvernant la RG et les phénomènes à grande échelle. Une telle incompatibilité, nous dit-on, ne saurait être résolue que si l'on prend un tout nouveau départ.

Toutes ces approches présentent des aspects attractifs, et pour cette raison possèdent chacune des disciples. Mais toutes ont aussi des lacunes. Il est impossible d'en faire une liste exhaustive dans le cadre de cet article. En dehors des deux défis principaux que doit relever la GQB, que je discuterai par la suite, je ne m'étendrai donc pas plus sur le sujet, sauf pour souligner le fait que toutes ces approches ont un problème majeur commun, à savoir leur manque total de lien avec les observations et l'expérience. Quelques propositions sont faites ici et là quant à la façon dont telle ou telle approche pourrait entrer en relation avec l'empirie, mais, jusqu'ici, ces propositions en restent à des suggestions le plus souvent pour le moins spéculatives concernant la manière dont, peut-être, une telle relation pourrait être établie. Ou bien la théorie proposée est trop malléable, de sorte qu'elle est capable de s'adapter à presque toute donnée empirique, comme c'est le cas de la théorie des cordes, dont d'une part les prédictions concernant les particules supersymétriques ont été révisées de façon constante au gré des échecs répétés des détecteurs de particules à les trouver aux valeurs d'énergie prédites, et qui, d'autre part, se trouve dans un *embarras de richesses*^{xiv}, avec le fameux « problème du paysage », qui consiste à devoir choisir parmi 10^{500} modèles différents. Ou bien encore le lien entre les données relativement bien comprises et les théories reste à la fois ténu et controversé, comme quand on se demande si, et si oui dans quelle mesure, les

données qui saisissent de façon étroite des violations possibles de la symétrie de Lorentz sont en relation avec les théories de la gravité quantique qui prédisent, ou font l'hypothèse que, la structure de l'espace-temps est discrète, ce qui est supposé impliquer une violation, ou au moins une modification, de la symétrie de Lorentz par ailleurs très bien confirmée aux échelles plus grandes. Ou bien les prédictions faites par les théories ne peuvent être testées que dans des cadres expérimentaux qui échappent de loin aux possibilités techniques actuelles, comme c'est le cas des prédictions de la GQB selon lesquelles l'espace-temps est discret à l'échelle de Planck, soit un quintillion de fois (10^{18}) les énergies que l'on cherche à obtenir avec le grand collisionneur de hadrons du CERN. Ou bien enfin, personne n'a tout simplement la moindre idée de comment la théorie pourrait être mise en relation avec l'empirie, comme dans le cas des approches embryonnaires du quatrième groupe, telles que la théorie à ensembles causaux.^{xv}

3. Introduction à la gravitation quantique à boucles

La GQB est, avec la théorie des cordes, une des théories de la gravité quantique à la fois les plus prometteuses et les plus importantes du point de vue du nombre de ses disciples. Il s'agit d'une approche canonique, qui prend pour point de départ la RG – la meilleure théorie classique de la gravitation que l'on possède – à laquelle est appliquée un procédé bien connu qui permet de concocter une théorie quantique à partir d'une théorie classique, ceci dans l'espoir d'obtenir une théorie quantique de la gravité viable. C'est là une approche fondamentalement conservatrice en ce sens qu'elle a pour ambition de rester aussi fidèle que possible aux théories physiques qui sont bien connues et déjà couronnées de succès.

Le procédé de quantification choisi ici – appelée *quantification canonique* – ne peut être appliqué que si la RG est reformulé en termes de système hamiltonien. Un système hamiltonien est un système physique qui obéit aux équations de Hamilton, qui sont des équations différentielles mettant en relation les positions (généralisées) et les quantités de mouvement (généralisées) de tous les degrés physiques de liberté avec l'énergie du système, donnant ainsi l'évolution temporelle

de tous les degrés de liberté du système.²⁰⁵ Il se trouve que les systèmes physiques obéissant les équations de Hamilton et pouvant donc être mis sous la forme de systèmes hamiltoniens sont à la fois nombreux et importants.

La RG, dans sa formulation habituelle, n'est pas formulée en termes de systèmes hamiltoniens. Au cœur de la RG standard se trouvent ce qu'on appelle les *équations du champ d'Einstein*, qui mettent en relation la géométrie de l'espace-temps, encodée dans le champ métrique, avec la distribution de matière et d'énergie dans cet espace-temps. Elles sont souvent interprétées comme décrivant une interaction dynamique entre la gravité, représentée par le champ métrique, et la distribution de matière-énergie.²⁰⁶ Les fameuses paroles de John Wheeler, disant que, en RG, la masse s'accroche à l'espace-temps, et lui dit comment se courber, tandis que l'espace-temps s'accroche à la masse, et lui dit comment se mouvoir,²⁰⁷ incarne cette interprétation des équations du champ d'Einstein comme gouvernant la coévolution dynamique de la métrique de l'espace et des champs de matière. Il nous faudra revenir sur cette interprétation de la RG dans la section suivante au moment où nous discuterons du problème du temps.

Une solution aux équations du champ d'Einstein se présente sous la forme d'un triplet $\langle M, g, T \rangle$ – où M est une variété différentiable à quatre dimensions, g un

²⁰⁵ Plus précisément, les équations de Hamilton sont un système d'équations du premier ordre imposant des contraintes dynamiques sur l'espace des phases du système, espace de dimension $2n$ si n est le nombre de degrés de liberté.

²⁰⁶ Mathématiquement parlant, les équations d'Einstein sont un système de dix équations différentielles partielles, non-linéaires, et indépendantes du second degré, qui se réduisent à six équations indépendantes quand on prend en compte la liberté de choix des coordonnées d'espace-temps. Quatre de ces six équations imposent des contraintes liées à l'invariance par difféomorphisme à quatre dimensions, sur laquelle nous reviendrons plus bas.

²⁰⁷ Le bon mot de Wheeler apparaît dans bon nombre de ses écrits, comme par exemple dans Wheeler (1990, xi).

champ métrique, et T ce qu'on appelle un *tenseur énergie-impulsion*, expression mathématique de la distribution de la matière et de l'énergie sur la variété – triplet donc tel que la relation entre g et T soit en accord avec les équations du champ d'Einstein en tout point de M . Si on regarde les choses d'un point de vue neutre, donc, les équations d'Einstein ne sont pas des équations *dynamiques* ; au lieu de cela, elles ne font qu'imposer des conditions locales sur les valeurs du couple champ métrique g – distribution de matière-énergie de l'univers telle que donnée par T . Et pourtant, il est nécessaire de comprendre la RG dynamiquement si l'on veut lui donner une formulation hamiltonienne. On attend d'une théorie dynamique qu'elle soit formulable clairement en termes de valeurs initiales – c'est-à-dire qu'il existe une formulation de la théorie qui permette d'obtenir l'évolution dynamique complète d'un système physique à tout instant sur la base des équations du mouvement et étant donnés un ensemble de conditions initiales à un instant donné. Le problème posé par la formulation hamiltonienne de la RG est donc naturellement lié au problème de Cauchy. Ce dernier, cependant, est difficile à bien poser dans le cadre de la formulation standard de RG, du fait que la division nécessaire de l'espace-temps à quatre dimensions en un « espace » qui évolue « dans le temps » semble bien violer l'une des leçons les plus centrales de la RG qui est qu'une telle division n'a aucune justification physique satisfaisante. Cette division forcée de l'espace-temps fait naître une inquiétude : tenter de comprendre la RG de façon dynamique pourrait bien mener nécessairement à mésinterpréter cette théorie. En réalité, bien que la formulation hamiltonienne de la RG requiert que l'espace-temps soit « feuilleté » en espaces à trois dimensions ordonnés selon un paramètre « temps » unidimensionnel, la leçon relativiste concernant le caractère quadridimensionnel de l'espace-temps est intégrée mathématiquement dans le cadre hamiltonien, à savoir dans les équations de contrainte de ce dernier, point sur lequel nous reviendrons plus bas.

On peut « dynamiser » la RG, et obtenir une version hamiltonienne de la théorie, de plusieurs façons. En général, le jeu consiste à trouver des coordonnées canoniques qui saisissent en quelque sorte une géométrie spatiale évoluant dans le temps. A

cette fin, les formulations hamiltoniennes de la RG découpe l'espace-temps en un feuilletage d'hypersurfaces tridimensionnelles (qui sont des sous-variétés de genre espace de M). La façon standard de procéder à ce feuilletage est traditionnellement appelée le *formalisme ADM*, du nom de ses fondateurs Richard Arnowitt, Stanley Deser, et Charles Misner. Le formalisme ADM prend les métriques tridimensionnelles (spatiales) induites par g sur les hypersurfaces spatiales comme variables de « position », et la courbure extérieure de ces hypersurfaces (plus précisément une combinaison linéaire des composantes de cette courbure), représentant la façon dont elles sont contenues dans l'espace-temps quadridimensionnel, comme variables de « quantité de mouvement », qui se conjuguent alors de façon canonique avec les métriques spatiales. Les équations de Hamilton peuvent être écrites sur cette base.

Il s'avère cependant que ces équations ne sont pas, à elles seules, équivalentes aux équations du champ d'Einstein. Pour obtenir l'équivalence, il faut leur joindre des équations supplémentaires contraignant les relations entre les variables canoniques. Ces équations de contraintes témoignent du fait que les données initiales ne peuvent pas être choisies arbitrairement, mais doivent bien satisfaire certaines conditions.²⁰⁸ On peut montrer que ces équations de contrainte sont l'expression mathématique de la présence de ce qu'on appelle une « liberté de gauge », soit une redondance représentationnelle dans la description mathématique de la situation physique.²⁰⁹ En particulier, elles apparaissent en conséquence du fait que le groupe des difféomorphismes quadridimensionnels est le groupe de symétrie

²⁰⁸ On trouvera des détails concernant le formalisme ADM et la façon dont les équations de contraintes y apparaissent dans Wald (1984, Chapitres 10 et Appendice E.2).

²⁰⁹ Sur ce sujet, voir Wüthrich (2006, Section 4.1) [NdT ainsi que l'article de A. Guay dans ce volume].

dynamique de la RG, en accord avec l'exigence de la covariance générale.²¹⁰ L'exigence de covariance générale est que la physique reste la même si les champs – y compris le champ métrique – sont tous déplacés de la même manière et de façon continue sur la variété. L'idée qui se trouve derrière cette exigence est donc que, bien que la représentation mathématique diffère selon que les champs sont déplacés ainsi ou non, la situation physique est la même dans les deux cas.

En réalité, deux équations (ou familles d'équations) de contraintes apparaissent. La première, représentant la liberté de choisir le feuilletage, est appelée la *contrainte hamiltonienne*. Il s'avère que l'hamiltonien des équations de Hamilton habituelles est lui-même une contrainte.²¹¹ On peut voir ainsi que l'absence d'une variable temps externe qui serve de repère fait de l'équation dynamique elle-même une contrainte, liée à la liberté de choisir une gauge sans conséquence observable. La seconde famille – qui comprend trois membres –, liée à la liberté de choisir les coordonnées spatiales dans l'espace à trois dimension, sont appelés *contraintes vectorielles*. Ceci nous fait un total de quatre équations de contrainte.

Une fois qu'on a obtenu une formulation hamiltonienne de RG, i.e. une fois qu'on a identifié les variables canoniques et que l'on a écrit toutes les équations de contraintes que ces dernières doivent satisfaire, on peut se lancer dans la quantisation de la théorie classique grâce au procédé de quantisation canonique, décrit par Paul Dirac (1964). Ce procédé a pour principe essentiel de prendre les variables canoniques et de les transformer en opérateurs quantiques agissant sur un espace d'états quantiques. Le jeu de relations entre ces variables, décrit par les crochets de Poisson au niveau classique, se mue en des relations de commutation canoniques entre des opérateurs de base, tandis que les équations de contraintes

²¹⁰ Un difféomorphisme est une application bijective et continue entre deux variétés différentiables dont l'inverse est aussi continue.

²¹¹ Je passe ici sur certains détails: à strictement parler, c'est une combinaison linéaire de contraintes des deux familles. Mais cela ne change pas le fait que ce soit une contrainte liée à un choix de gauge.

deviennent des équations d'onde d'opérateurs de contraintes identiques, du point de vue fonctionnel, aux fonctions de contraintes classiques, et agissant sur les états quantiques. Seuls les états quantiques qui satisfont ces équations de contraintes quantiques comptent comme états physiques acceptables.

Les tentatives d'obtention d'une théorie quantique de la gravité en usant du formalisme ADM et par quantification canonique se sont heurtées à des difficultés techniques insurmontables, comme par exemple le fait que les équations de contraintes ne sont pas polynomiales. A un moment donné, il semblait que tout espoir d'obtenir une théorie quantique de la gravité par quantification canonique était tout simplement perdu. Mais c'est alors que, dans les années 80, Abhay Ashtekar trouva, en s'appuyant sur le travail de Amitabha Sen, de nouvelles variables. Ces variables d'Ashtekar permettent de simplifier les équations de contrainte de façon significative, même si on perd la signification directement géométrique des variables ADM.²¹² Je vous épargne ici les détails – qu'on peut trouver dans n'importe quelle présentation un peu sérieuse de la GQB.²¹³ Mentionnons seulement ici que le principe de base consiste en ce que la géométrie de l'espace-temps est donnée par un « champ triade » représentant les référentiels inertiels locaux définis sur les hypersurfaces spatiales, au lieu de l'être par la métrique spatiale. Ces approches permettent toutes deux de représenter la géométrie de l'espace-temps, et la traduction de l'une à l'autre est possible, bien qu'il y ait une famille de contrainte supplémentaire dans la GQB, qui est liée aux symétries internes. Pour ne retenir que l'essentiel, le passage des variables ADM aux variables d'Ashtekar consiste en une réinterprétation des équations du champ d'Einstein comme des énoncés concernant, non pas la métrique comme c'était avant le cas, mais une « connexion » – un outil mathématique qui sert à décrire ce qui

²¹² Et même si ces simplifications dépendent de la résolution encore aujourd'hui aussi problématique que controversée d'un certain nombre de difficultés techniques.

²¹³ Rovelli (2004) est le manuel standard.

arrive à des vecteurs tangents à une variété quand ils sont transportés d'un point de la variété à un autre le long d'une courbe. La théorie de la relativité générale, réinterprétée ainsi, est ensuite soumise au procédé de quantification canonique décrit ci-dessus.

Il se trouve que les équations de contraintes ne peuvent pas toutes être résolues facilement. Pour tout dire, seule deux des trois familles d'équations de contraintes ont été à ce jour résolues. Si on définit l'*espace physique de Hilbert* comme l'espace de tous les états quantiques de la théorie qui sont solutions de toutes les équations de contrainte, et qui donc doivent être considérés comme les états *physiques*, alors il faut admettre que l'espace physique de Hilbert de la GQB n'est pas encore connu. L'espace, plus grand, des états qui sont solutions des deux premières familles d'équations de contrainte est souvent appelé l'*espace cinématique de Hilbert*. La contrainte qui a jusqu'ici opposé résistance à toute résolution est l'équation de contrainte hamiltonienne, à la forme apparemment simple $\hat{H}|\phi\rangle=0$, appelée l'*équation de Wheeler-DeWitt*, où \hat{H} est l'opérateur hamiltonien interprété habituellement comme la source de l'évolution dynamique et $|\phi\rangle$ est un état quantique de l'espace cinématique de Hilbert. Bien entendu, l'opérateur hamiltonien \hat{H} est une fonction(elle) complexe des opérateurs de bases correspondant aux variables canoniques. En réalité, la forme fonctionnelle elle-même de \hat{H} est l'objet de controverses, du fait qu'il existe plusieurs candidates possibles non-équivalentes les unes aux autres. Dans la mesure où l'espace physique de Hilbert n'a pas encore été totalement construit, la GQB reste donc incomplète.

Etant donné que l'espace physique de Hilbert est un sous-espace de l'espace cinématique de Hilbert, tous les états physiques sont aussi des éléments de l'espace cinématique de Hilbert. Heureusement, nous en savons bien plus sur ce dernier. Ses éléments sont les *états des réseaux de spin*, c'est-à-dire les états quantiques du champ gravitationnel, ou au moins de la distribution spatiale de ce dernier. Les états des réseaux de spin peuvent être représentés par un graphe annoté où ils sont inscrits dans un cadre spatio-temporel (cf. Figure 1). L'espace physique est supposé

être, au niveau fondamental, un état de réseaux de spin ou une superposition quantique de tels états.²¹⁴

²¹⁴ Plus précisément, du fait que les états de réseaux de spin ne sont pas invariants par difféomorphisme, des *classes d'équivalence* d'états de réseaux de spin par difféomorphisme à trois dimensions doivent être prises pour représenter la structure fondamentale de l'espace physique. Le fait que les états de réseaux de spin ne sont pas invariants par difféomorphisme se voit facilement quand on considère que, à strictement parler, les faire se ballader – tous ou une partie d'entre eux – sur l'espace les contenant sans changer leur structure nodale telle qu'elle est indiquée par les flèches de la Figure 1 résultera en un réseaux de spin différents à chaque fois. Mais comme c'est la structure nodale qui représente la situation physique, et non la façon particulière dont cette structure est inscrite dans l'espace, on doit considérer ce que les mathématiciens appellent des *graphes abstraits*, i.e. des classes d'équivalence de graphes dont la structure nodale est la même, mais inscrite de façons différentes dans l'espace. Ce point, important bien que subtil, sera ignoré dans la suite.

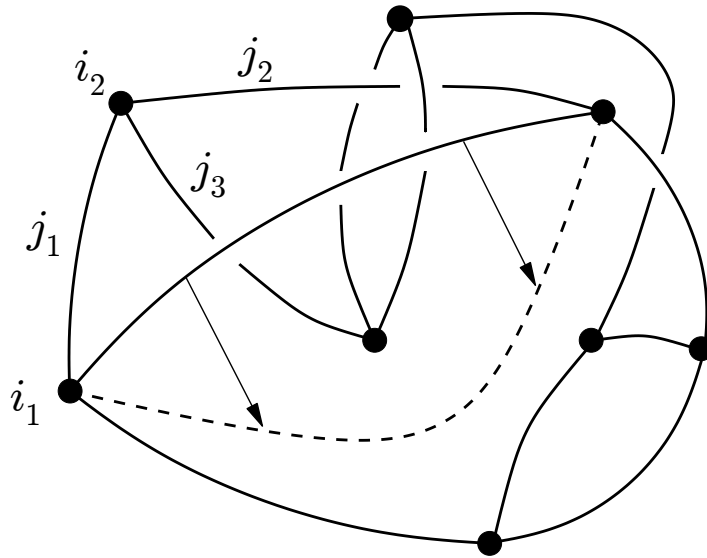


Figure 1 : Les états des réseaux de spin peuvent être représentés par des graphes annotés.

L'essentiel de la structure de l'espace physique est ainsi saisi par des graphes annotés du type de la Figure 1. Comme il apparaît sur la figure, les représentations en spin se situent sur les sommets du graphe (les nœuds) ainsi que sur les arêtes (les lignes qui joignent les nœuds). Ce que les sommets, les i_k , représentent, ce sont les nombres quantiques indiquant la « taille » des « atomes d'espace », tandis que ce que représentent les arêtes, les j_l , ce sont les « tailles » de la surface de connexion entre des « morceaux » d'espace adjacents. Les états de réseaux de spin sont des structures discrètes. On voit donc que, selon la GQB, l'espace physique est granulaire à l'échelle minuscule qu'est celle de Planck. Ainsi, l'espace continu de la théorie classique est supplanté par une structure quantique discrète. Par conséquent, l'espace tel qu'il figure dans notre conception du monde est un phénomène émergent, et non un élément de réalité fondamentale. C'est du moins là ce qu'affirme la GQB.

Les deux problèmes les plus pressants que face la GQB sont notre manque de compréhension de la dynamique, ou, de façon équivalente, notre incapacité à résoudre l'équation de contrainte hamiltonienne, ainsi que notre échec à rendre compte de l'émergence de l'espace-temps continu classique, ou, de façon équivalente, des raisons du succès des théories gravitationnelles classiques telles

que la RG. Ces problèmes présentent tous deux des aspects techniques aussi bien que philosophiques, et tous deux surgissent, d'une façon ou d'une autre, dans le cadre de nombre des principales approches de la gravité quantique. Par exemple, le problème technique de la résolution de l'équation de contrainte hamiltonienne en GQB est intimement lié au problème du temps, qui a de nombreuses dimensions philosophiques. De plus, dans la mesure où la théorie des cordes contient la RG, elle doit aussi traiter le problème du temps, au moins dans sa formulation très générale qui exige que soit résolue la tension conceptuelle existant entre, d'un côté, la notion pré-relativiste d'un temps extérieur au, et indépendant du système physique considéré, dont il est fait usage par les théories quantiques et la théorie des cordes, et, d'un autre côté, la conceptualisation nouvelle du temps comme un acteur physique inséparable de l'espace et interagissant avec les champs de matière ainsi qu'avec les autres formes d'énergie. Naturellement, la forme précise du problème varie cependant, et parfois de façon radicale, d'une approche à l'autre. Ce sont ces deux problèmes majeurs qui seront traités, chacun leur tour, dans les deux dernières sections ci-dessous, avec une attention particulière portée aux aspects conceptuels et philosophiques plutôt que techniques.

4. Le problème du temps

Il est bien connu que le philosophe présocratique Parménide d'Élée soutenait que le monde, fondamentalement, est un tout indestructible, immuable, et existant de toute éternité. Le changement, selon lui, n'est que pure apparence et ce qui existe en réalité est « gelé » temporellement. Très peu de philosophes, en particulier ces derniers siècles, ont suivi Parménide sur cette voie métaphysique radicale. De façon surprenante, son hypothèse pour le moins courageuse reçoit un certain soutien de la part de la RG (dans sa formulation hamiltonienne) et des théories quantiques qui sont fondées sur cette dernière.

Déjà en RG standard, il est loin d'être facile d'isoler le temps physique, qui, de façon générale, et quelle que soit sa nature, ne fait qu'induire un pré-ordre de priorité temporelle sur l'ensemble des événements sur la variété. Un *pré-ordre* est une

relation binaire Rxy définie sur un ensemble X , qui est réflexive et transitive, mais en général ni faiblement antisymétrique, ni comparable. On parle d'antisymétrie faible quand est satisfaite la condition que, pour deux événements a et b , si a précède temporellement b (ce qui inclut le cas où les deux événements sont simultanés), et b précède temporellement a , alors ils sont simultanés. La condition d'antisymétrie faible est satisfaite à moins que le temps soit circulaire ou ait une topologie étrange, et de ce fait, elle est généralement considérée comme une condition nécessaire pour avoir un ordre qui puisse être légitimement considéré comme *temporel*. Mais le temps en RG n'est pas faiblement antisymétrique, puisqu'il peut y avoir deux événements qui soient chacun en relation de précédence temporelle avec l'autre sans pour autant être simultanés. Il n'est pas non plus comparable puisque toute paire d'événements séparés par un intervalle de genre espace n'entretient absolument aucune relation temporelle, ce qui serait requis pour que l'on ait comparabilité. On peut récupérer l'antisymétrie faible dans les espaces-temps dont la topologie est du type $\Sigma \times R$, où Σ est un espace à trois dimensions, R est l'ensemble des réels, et \times désigne le produit cartésien. Les espaces-temps de ce type peuvent être divisés en un « espace » et un « temps » – même si en général il existe un nombre infini de façons également valides de procéder à une telle division. En revanche, ce n'est que si un unique feuilletage, c'est-à-dire une seule façon de diviser, peut être privilégié selon un certain principe physique que l'on peut retrouver la comparabilité, et par là, le caractère total de la relation d'ordre.

Puisque la formulation hamiltonienne de la RG requiert que l'espace-temps soit feuilleté de telle sorte que des systèmes spatiaux évoluent dans le temps, elle ne peut traiter que des espaces-temps à topologie du type $\Sigma \times R$. Il pourrait sembler que les difficultés liées à la notion de temps soient atténuées au sein de la formulation hamiltonienne de la RG (et par conséquent au sein des approches de la gravité quantique qui en dérive) par rapport au cas de la RG standard. Mais une telle apparence est trompeuse ; en réalité, la situation est encore pire. En un sens, la notion de temps s'évanouit et toutes les grandeurs physiques se retrouvent forcées à rester parfaitement constantes au cours du temps.

Pour ce qui est de la disparition complète du temps au sein de la gravité quantique canonique, Wheeler et Bryce DeWitt remarquèrent dans les années 60 que l'équation dynamique de base, celle-là même qui porte leurs noms et que nous avons écrit plus haut ici, ne contient pas de paramètre temps. Par rapport à l'équation de Schrödinger,

$$H|\psi\rangle = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle$$

qui donne la dynamique des systèmes quantiques non-relativistes, toute la partie à droite du signe égal disparaît dans l'Equation de Wheeler-DeWitt, et, avec elle le paramètre temps t . Pour ce qui concerne donc les théories canoniques de la gravité quantique, la notion de temps disparaît complètement du tableau. La disparition du temps dans les équations dynamiques de l'approche canonique peut être considérée comme un témoignage de la tension conceptuelle à laquelle se confronte quiconque tente de réconcilier ensemble la version édulcorée de la notion de temps des espaces-temps relativistes avec la notion de temps externe, se déployant de façon constante et indépendamment des systèmes physique dont elle permet l'évolution, que l'on trouve en mécanique quantique. C'est peut-être là une conséquence du fait que le temps y faisait partie du système physique, à savoir l'espace-temps, que l'on a quantifié. En physique relativiste, il est bien clair qu'il n'y a pas de paramètre temps externe qui puisse servir de repère pour l'évolution dynamique. Ceci dit, conclure directement de la forme de l'équation de Wheeler-DeWitt que le temps a disparu, serait aller un peu trop vite. Le temps pourrait évidemment encore être présent, mais sans que la dynamique ne le « porte » de façon ostentatoire, comme il ne convient de le faire qu'en physique relativiste.

Certains physiciens comme Carlo Rovelli et Julian Barbour, cependant, ont fait leur la conclusion plus radicale, et ont par conséquent tenté de formuler la mécanique quantique de façon à ce que cette dernière ne requiert pas l'existence d'un temps externe rythmant l'évolution dynamique, et que, au lieu de cela, le temps soit

remplacé par une relation directe entre les événements.²¹⁵ Ceci dit, on peut accepter l'idée que le temps n'existe pas au niveau quantique sans cependant se soumettre à celle que la mécanique quantique est relationnelle, du moment que l'on puisse montrer que la RG est capable de décrire le *changement* et comprendre comment l'espace-temps classique émerge de la structure quantique sous-jacente, ou, pour le dire autrement, comment la RG classique est valide comme approximation limite de la GQB aux basses énergies. La RG peut aisément satisfaire la première de ces deux exigences: même si le temps en RG ne permet pas, en général, d'ordonner même partiellement les événements de façon valide, objective et universelle, on peut y rendre compte du changement de façon relationnelle comme la modification des propriétés des systèmes physiques le long de leur lignes d'univers. Il n'existe, en revanche, pas de solution facile pour la deuxième exigence, comme nous le verrons en section 5 ci-dessous.

Même si le changement peut être décrit dans la version standard de la RG, il est un autre aspect du problème du temps qui semble indiquer que l'apparence qu'il n'y a pas de temps en gravité quantique n'est en réalité pas trompeuse dans la mesure où il n'y a pas non plus de changement au niveau le plus fondamental de la réalité physique.²¹⁶ En effet, dans sa formulation hamiltonienne, la RG ne peut même pas rendre compte du changement au niveau des propriétés des systèmes physiques. On voit donc que le problème du temps, ou du moins du *changement*, surgit déjà au niveau classique, même si ce n'est que dans une formulation de la RG. Parménides, semble-t-il, avait raison : le changement n'existe pas, et tout reste gelé, si j'ose dire, dans le temps.

Formellement, ceci vient du fait que la re-paramétrisation de l'(espace-)temps est une symétrie de gauge de la théorie. Plus précisément, le groupe de symétrie dynamique des équations d'Einstein est $\text{Diff}(M)$, le groupe des difféomorphismes à

²¹⁵ Pour une référence canonique sur la "mécanique quantique relationnelle", voir Rovelli (1996); pour une présentation tout public, voir Callender (2010).

²¹⁶ Cf. Wüthrich (2006, 4.3).

quatre dimensions sur M , qui devient dans la formulation hamiltonienne de la RG un ensemble de contraintes qui engendrent ces difféomorphismes spatio-temporels. Autrement dit, le changement n'est rien d'autre qu'une redondance au sein de la représentation mathématique. Au cœur du problème se trouve l'exigence qu'aucune grandeur physique ne saurait dépendre de la simple représentation mathématique d'une situation réelle – plus précisément du système de coordonnées dans lequel la situation est décrite. Cette exigence est tout à fait raisonnable, puisque les changements de représentation n'ont aucune conséquence observable. La physique reste la même, quel que soit le système de coordonnées utilisé par les humains pour la décrire.

En dépit de sa conclusion pour le moins contre-intuitive, il nous faut prendre l'argument du paragraphe ci-dessus sérieusement, comme nous presse de le faire John Earman (2002).²¹⁷ La conclusion n'est pas le résultat d'un raisonnement futile, et chacune des étapes peut être défendue de façon solide. Il n'est donc pas possible de s'en défaire d'un revers de main. Une façon directe et efficace de se débarrasser de cette conclusion gênante serait bien évidemment de refuser toute pertinence physique à la formulation hamiltonienne de la RG, comme semble vouloir le faire Tim Maudlin (2002). En effet, les conséquences qui s'imposent à nous dans ce cadre peuvent être considérées comme une réduction à l'absurde pour l'approche toute entière. Mais ce serait là aller trop vite : la quantification canonique a rencontré de nombreux succès dans d'autres domaines tels que l'électrodynamique et offre une route vers le Saint Graal de la gravité quantique qui est fondée physiquement et relativement bien maîtrisée mathématiquement.

Il existe de multiples façons de traiter du problème du temps, comme en témoigne le déluge de réponses de la part tout aussi bien de physiciens que de philosophes à l'appel à contribution du Foundational Questions Institute (FQXi) pour le prix du meilleur essai concernant la nature du temps.²¹⁸ Je ne m'étendrai pas ici sur ces

²¹⁷ Mais il y a aussi des opposants: cf. Maudlin (2002).

²¹⁸ Cf. par exemple Barbour (2008), Kiefer (2008), et Rovelli (2008).

propositions, mais il suffira de dire que les réponses au problème du temps sont sans doute tout aussi bigarrées qu'est consensuelle l'idée qu'on ne verra probablement pas de progrès substantiel en physique fondamentale sans passer par une réflexion soutenue sur la nature du temps et son rôle en gravité quantique. Quelle que soit la position où l'on se place dans le débat, une autre chose est claire : comprendre comment l'espace-temps classique émerge de la structure quantique fondamentale non spatiotemporelle éclairera le problème du temps de façon importante.

5. Espace-temps : disparition et ré-émergence

En théorie des cordes comme en GQB, ainsi que dans les autres approches de la gravité quantique, tout semble indiquer que non seulement le temps, mais aussi l'espace ne sont pas des entités fondamentales, mais plutôt des phénomènes « émergents » qui surgissent depuis la physique fondamentale. Dans la langue de la physique, les théories de l'espace-temps telles que la RG sont des théories « effectives » et l'espace-temps lui-même est « émergent », tout comme la thermodynamique est une théorie effective et la température une propriété émergente au niveau effectif, du fait qu'elle provient du comportement collectif des molécules de gaz. Cependant, à la différence de l'idée que la température n'est qu'un phénomène émergent, la pensée que l'univers n'est pas dans l'espace et le temps choque sans doute notre notion même d'existence physique de façon plus profonde qu'aucune autre révolution scientifique. On se demande même si on peut formuler une théorie physique de façon cohérente en dehors de l'espace et du temps.²¹⁹

L'espace disparaît en GQB dans la mesure où les structures physiques qui y sont décrites ne ressemblent que peu, peut être pas du tout, aux géométries spatiales que l'on peut trouver en RG. Comme nous l'avons vu dans la Section 3, ces structures sont discrètes, et non continues, comme le sont les espaces-temps classiques. Elles représentent les éléments constituant notre univers au niveau fondamental, qui correspondent, en quelque sorte, à des morceaux d'espace physique, et ainsi donne

²¹⁹ Maudlin (2007) ne pense pas que ce soit le cas.

lieu, d'une façon qu'il convient encore d'élucider, à l'apparition des géométries spatiales que l'on trouve en RG classique. Il faut souligner que le fait que l'espace-temps est remplacé par une structure *discrète* au niveau quantique est une conséquence bien établie et tout à fait attendue de certains postulats de base communs à une vaste classe de théories quantiques de la gravité, y compris la GQB.²²⁰ Le problème conceptuel qui consiste à comprendre comment on peut faire de la physique en absence d'un cadre spatio-temporel sous-jacent, dans lequel la physique peut « avoir lieu », est intimement lié à la difficulté technique qui consiste mettre en relation LA GQB et la RG. Les physiciens n'ont pas encore fini de travailler à comprendre tout à fait comment les espace-temps classiques émergent depuis la structure fondamentale non spatio-temporelle de LA GQB, et les philosophes commencent à peine à étudier les fondements conceptuels de cette théorie ainsi que les conséquences de la gravité quantique en général, et de la disparition de l'espace-temps en particulier.²²¹ Même si le gros œuvre reviendra aux physiciens, les philosophes ont ici un rôle à jouer dans l'exploration et la cartographie du paysage des possibilités conceptuelles, en faisant entrer en jeu l'immense littérature philosophique disponible sur les questions d'émergence et de réduction, qui offre une boîte à outil conceptuelle bien fournie. Je finirai ici par quelques mots qui peuvent servir de préalable à la conception de lignes de recherche en vue d'une solution à ces problèmes.

Concevoir comment l'espace-temps classique émerge depuis la structure quantique fondamentale implique que l'on « prenne la limite classique », comme le disent les physiciens. D'une certaine façon, faire en retour le lien entre les états de réseaux de spin de la GQB et les espaces-temps de la RG revient à engager la procédure inverse de la procédure de quantification utilisée au départ pour formuler la théorie

²²⁰ Cf. Smolin (2009, 549).

²²¹ A ma connaissance, la littérature concernant l'émergence en gravité quantique canonique se réduit aux deux articles de Butterfield et Isham (1999, 2001) cités en bibliographie, et à Wüthrich (2006).

quantique. Ainsi, tandis qu'on peut considérer la quantification comme le « contexte de la découverte », trouver la limite classique qui permet de faire le lien entre la théorie quantique et la RG doit être conçu comme le « contexte de justification (partielle) ». Il faut souligner ici que comprendre comment l'espace-temps (classique) ré-émerge en montrant comment la RG peut être récupérée comme la limite aux basses énergies d'une théorie plus fondamentale est non seulement important pour « sauver les apparences » et pour satisfaire le sens commun – bien que bien entendu ces aspects comptent également –, mais doit surtout être considérée comme un exigence méthodologique centrale du projet de la gravité quantique. S'il n'est pas possible de montrer qu'il existe entre la RG et la GQB une certaine relation mathématique bien comprise où la RG apparaît comme la théorie approximativement correcte quand les niveaux d'énergie sont suffisamment bas, ou, de façon équivalente, à des échelles suffisamment grandes, alors la GQB ne peut pas expliquer pourquoi la RG a pu être couronnée de succès comme elle l'a été.²²² Or une théorie couronnée de succès ne saurait être supplantée par une autre théorie que si cette dernière non seulement fait des prédictions nouvelles ou donne des explications plus profondes, mais aussi est capable de reproduire le succès empirique de la théorie qu'elle prétend pouvoir remplacer.

En fin de compte, bien entendu, l'analyse du problème dépendra de la façon dont la théorie complète sera articulée. Considérons malgré tout l'analyse conceptuelle de Jeremy Butterfield et Chris Isham (1999, 2001), en nous concentrant cependant sur le seul niveau cinématique, afin d'éviter d'avoir à traiter du problème du temps en son entier comme eux sont contraints le faire, et appliquons cette analyse non seulement à la question de l'émergence du temps, comme ils le font, mais aussi à celle de l'émergence de l'espace-temps dans sa totalité. Butterfield et Isham distinguent entre trois types de relation de réduction entre des théories : *l'extension définitionnelle*, *la supervénience*, et *l'émergence*, parmi lesquelles seule la troisième a une chance de pouvoir s'appliquer pour ce qui nous concerne. Selon Butterfield et

²²² Et de fait, elle a bien été couronnée de succès; cf. Will (2006).

Isham, une théorie T_1 est dite *émerger* d'une autre théorie T_2 si et seulement s'il existe un procédé de dérivation comme limite, ou d'approximation (ou quelque combinaison des deux) d'une théorie à l'autre. Un *procédé de dérivation comme limite* consiste à prendre la limite mathématique, en général dans un ordre particulier, de certains paramètres de la théorie sous-jacente, paramètres qui sont pertinents du point de vue physique, afin d'en arriver à la théorie émergente. Un tel procédé ne peut pas marcher dans notre cas, du moins pas s'il est appliqué seul, du fait de problèmes techniques concernant d'un côté la densité de boucle maximale, et de l'autre le problème de la mesure bien familier en mécanique quantique non-relativiste.

Un *procédé d'approximation* consiste ou bien à négliger, justification à l'appui, certaines grandeurs physiques, ou bien à sélectionner, ici encore justification à l'appui, un sous-ensemble propre de l'espace des états de la théorie « approximans » – celle qui sera l'approximation de l'autre, ou bien à faire les deux, le tout afin de se trouver avec une théorie dans laquelle les valeurs des grandeurs physiques restent suffisamment proches de celles de la théorie à approximer, la théorie « approximanda ». Notons que, dans notre cas, la théorie approximanda ne sera pas la RG, mais seulement au secteur du vide des espaces de topologie $\Sigma \times R$. L'une des questions centrales sera celle de savoir comment justifier la sélection faite sur les états. Une telle justification peut être obtenue si on parvient à identifier un mécanisme par lequel le système est « dirigé » vers les états voulus. Toute tentative de ce genre nous imposera de traiter d'une foule de difficultés liées au problème bien connu des liens entre mécanique quantique et classique. Il est possible qu'un mécanisme de ce genre puisse être trouvé dans une forme de « décohérence », même si les formes standard de décohérence comprennent une notion d'« environnement » avec lequel le système considéré est en interaction. Or le système qui nous intéresse ici est, bien entendu, l'univers lui-même, ce qui rend difficile de voir comment il pourrait y avoir un environnement extérieur avec lequel le système pourrait interagir. Le défi qui se présente à nous consiste donc à conceptualiser la décohérence d'une façon qui contourne ce problème.

Même s'il reste encore beaucoup de travail à accomplir, du point de vue technique comme du point de vue philosophique, je m'aventurerai ici à avancer la thèse – ou devrais-je dire la « reconnaissance de dette » – selon laquelle, dans la mesure au moins où la GQB est une théorie cohérente, la RG (ou une proche cousine) peut être considérée comme émergeant de la GQB si une subtile combinaison de procédés de dérivation comme limite et d'approximation est mise en place. Cette affirmation est illustrée en Figure 2, où on peut voir que l'idée consiste à appliquer d'abord un procédé d'approximation au niveau de la théorie quantique – théorie consistant en un espace de Hilbert H et un ensemble d'opérateurs $\{\hat{O}\}$ définis sur H –, procédé qui permette de diriger le système physique vers un sous-espace semi-classique qui peut être à son tour mis en relation avec l'espace classique des états Γ au moyen d'une dérivation comme limite. Il est bien certain que ce n'est là qu'une esquisse grossière, et il y faut ajouter beaucoup de détails, mais on peut se reporter à Wüthrich (2006, Ch. 9) pour un début d'analyse dans cette direction.

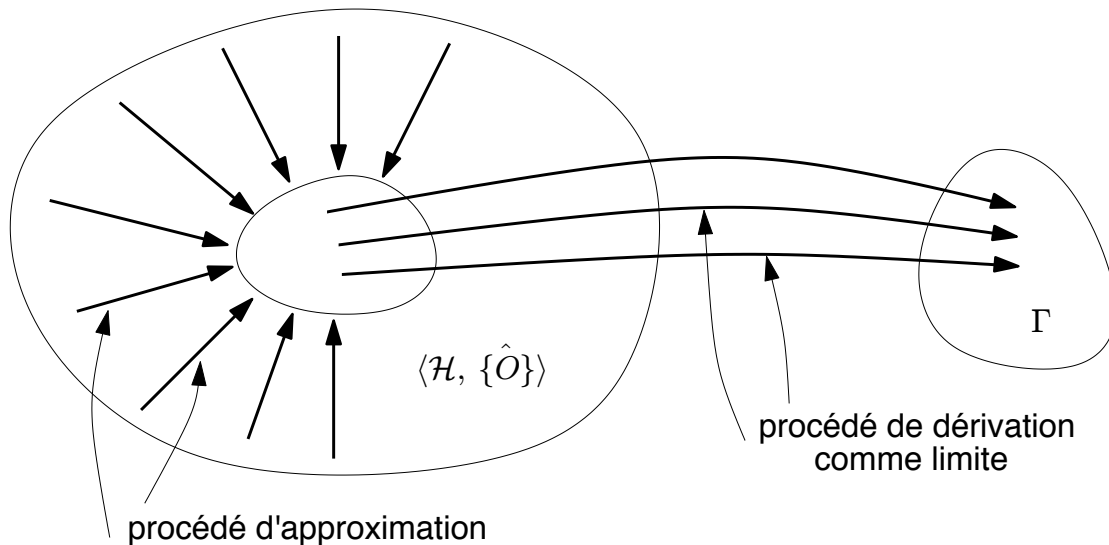


Figure 2 : Une application du schéma proposé par Butterfield et Isham.

Une fois qu'on aura compris comment l'espace et le temps classiques disparaissent en gravité quantique canonique, et comment ils pourraient bien ré-émerger depuis la structure fondamentale non spatio-temporelle, la façon dont la classicalité émerge depuis la théorie quantique de la gravité ne diffère pas vraiment de la façon dont elle émerge de la mécanique quantique ordinaire. Chercher à comprendre cela est un projet pertinent et intéressant pour au moins deux raisons. Premièrement, le projet touche certaines questions fondamentales importantes concernant l'interprétation des théories, et les relations que ces théories entretiennent entre elles, questions dont la résolution peuvent mener à des clarifications conceptuelles pour les fondements de la physique. Un progrès conceptuel de ce type pourrait bien se trouver être une étape cruciale sur la route menant vers la formulation d'une théorie de la gravité quantique complète. Deuxièmement, la gravité quantique est un sol fertile pour tout métaphysicien puisqu'elle aura inévitablement des implications concernant les questions philosophiques, et en particulier les questions métaphysiques de la nature de l'espace et du temps.

Remerciements

Je veux remercier ici Soazig Le Bihan pour son invitation à contribuer à ce volume, pour la traduction de cet article ainsi que pour sa grande patience. Ce projet a été subventionné en partie par une Collaborative Research Fellowship offerte par le American Council of Learned Societies, en partie par une UC President's Fellowship in the Humanities offerte par l'University of California, et en partie par une Arts and Humanities Award offerte par l'University of California, San Diego.

Bibliographie

Barbour, Julian (2008), « The nature of time », disponible sur www.fqxi.org/community/forum/topic/360.

Butterfield, Jeremy et Chris Isham (1999), « On the emergence of time in quantum gravity », in J. Butterfield (dir.), *The Arguments of Time* (Oxford University Press), 111-168.

Butterfield, Jeremy et Chris Isham (2001), « Spacetime and the philosophical challenge of quantum gravity », in Callender et Huggett, 33-89.

Callender, Craig (2010), « Is time an illusion? », *Scientific American*, June: 58-65.

Callender, Craig et Nick Huggett (dir.) (2001), *Philosophy Meets Physics at the Planck Scale* (Cambridge University Press).

Dirac, Paul A M (1964), *Lectures on Quantum Mechanics* (Belfer Graduate School of Science

Monograph Series, New York). Ré-imprimé par Dover Publications, Mineola, NY (2001).

Earman, John (2002), « Thoroughly modern McTaggart, or what McTaggart would have said if he had read the general theory of relativity », *Philosophers Imprint* 2/3.

Huggett, Nick et Craig Callender (2001), « Why quantize gravity (or any other field for that matter)? », *Philosophy of Science* 68: S382-S394.

Isham, Chris (1994), « Prima facie questions in quantum gravity », in J. Ehlers et H. Friedrich (dir.), *Canonical Gravity: From Classical to Quantum* (Springer), 1-21.

Kiefer, Claus (2008), « Does time exist in quantum gravity? », disponible sur www.fqxi.org/community/forum/topic/265.

Mattingly, James (2006), « Why Eppley and Hannah's thought experiment fails », *Physical Review D* 73: 064025.

Maudlin, Tim (2002), « Thoroughly muddled McTaggart or how to abuse gauge freedom to create metaphysical monstrosities », *Philosophers Imprint*, 2/4. Avec une réponse de John Earman.

Maudlin, Tim (2007), « Completeness, supervenience and ontology », *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* 40: 3151-3171.

Rovelli, Carlo (1996), « Relational quantum mechanics », *International Journal of Theoretical Physics* 35: 1637-1678.

Rovelli, Carlo (2004), *Quantum Gravity* (Cambridge University Press).

Rovelli, Carlo (2008), « Forget time », disponible sur www.fqxi.org/community/forum/topic/237.

Smolin, Lee (2009), « Generic predictions of quantum theories of gravity », in D. Oriti (dir.), *Approaches to Quantum Gravity* (Cambridge University Press), 548-570.

Wald, Robert M (1984), *General Relativity* (University of Chicago Press).

Wheeler, John A (1990), *A Journey Into Gravity and Spacetime* (Scientific American Library).

Will, Clifford M (2006), « The confrontation between general relativity and experiment », *Living Rev. Relativity* 9/3. www.livingreviews.org/lrr-2006-3.

Wüthrich, Christian (2005), « To quantize or not to quantize: fact and folklore in quantum gravity », *Philosophy of Science* 72: 777-788.

Wüthrich, Christian (2006), *Approaching the Planck Scale from a Generally Relativistic Point of View: A Philosophical Appraisal of Loop Quantum Gravity*, PhD dissertation, University of Pittsburgh.