

# Aspects structuraux de l'espace-temps dans la théorie de la relativité générale

Vincent Lam<sup>1</sup>  
Université de Lausanne

## Résumé

Cet article se propose d'étudier certains aspects de la nature de l'espace-temps tel que décrit par la théorie classique de la relativité générale. En particulier, deux propriétés liées fondamentales de cette théorie sont discutées : la covariance générale 'substantielle', comprise comme invariance au sens de la théorie de jauge sous les difféomorphismes actifs et l'indépendance de fond ('background independence'), dérivant de la nature spécifique et dynamique du champ métrique-gravitationnel. Une interprétation de l'espace-temps comme structure physique (dans un sens précis) est avancée comme conséquence possible ; le lien avec le débat contemporain entre substantialisme et relationalisme est discuté.

1. Introduction
2. La représentation géométrique standard de l'espace-temps
3. Invariance de jauge et indépendance de fond
4. Réalisme structural et espace-temps
5. Identité structurale des points de l'espace-temps
6. Structure des observables
7. Métaphysique de l'espace-temps
8. Conclusion

## 1. Introduction

Cette contribution se propose de discuter certains aspects de la nature de l'espace-temps et de la gravitation tels que décrits par la théorie de la relativité générale. Cette théorie est non seulement expérimentalement très bien vérifiée (de ce point de vue, l'une de nos meilleures théories physiques à ce jour), mais possède des aspects particuliers que beaucoup considèrent comme fondamentaux. Pour certains chercheurs, ces aspects constituent de véritables guides sur le chemin de l'élaboration d'une théorie plus fondamentale (quantique par exemple) de l'espace-temps et de la gravitation ; dans ce sens, il se peut que ces aspects capturent bien des éléments fondamentaux de la nature. Dans le cadre de cette contribution, je vais plus particulièrement discuter les implications des propriétés de covariance générale ('substantielle'), comprise comme une invariance de jauge, et d'indépendance de fond ('background independence' en anglais), traduisant la nature fondamentalement dynamique de l'espace-temps. Ces propriétés fondamentales de la théorie de la relativité générale (en particulier la première) ont été largement discutées dans le cadre du débat contemporain sur la nature de l'espace et du temps, débat que l'on peut comprendre dans une certaine mesure comme la version moderne de celui entre Newton et Leibniz. Il ne s'agit pas ici de fournir un compte-rendu de ce débat contemporain. Je discute plutôt une interprétation particulière de l'espace-temps (et de la gravitation) dans le cadre de la conception métaphysique récemment développée du réalisme structural ontologique. La covariance générale substantielle et l'indépendance de fond peuvent en effet être interprétées de manière convaincante comme

---

<sup>1</sup> Je suis reconnaissant au Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS, Ambizione PZ00P1\_142536/1) pour son soutien financier.

favorisant une conception de l'espace-temps (et de la gravitation) en tant que structure physique dans le sens précis d'un réseau de relations physiques entre des relata physiques ne possédant pas d'identité intrinsèque. Ce dernier point constitue l'élément essentiel du réalisme structural ontologique : selon cette conception, les objets fondamentaux considérés, les points de l'espace-temps par exemple, ne possèdent pas d'identité intrinsèque et donc ne peuvent être considérés indépendamment les uns des autres. Une telle conception de l'espace-temps (et de la gravitation) fournit un cadre interprétatif convaincant aux questions soulevées par le célèbre argument du trou et par le problème du temps et du changement, questions qui se trouvent au cœur des difficultés rencontrées dans les tentatives de quantification de la théorie de la relativité générale.

Le plan de cette contribution est le suivant. Dans la section suivante, je vais introduire quelques éléments essentiels de la représentation géométrique standard de l'espace-temps et de la gravitation dans le cadre de la relativité générale (section 2). Les propriétés fondamentales de la covariance générale substantielle et de l'indépendance de fond sont ensuite présentées (section 3). Le réalisme structural ontologique est introduit comme conception métaphysique au sujet de (certains aspects de) la nature, puis est plus spécifiquement appliqué au cas de l'espace-temps (et de la gravitation) tel que représenté par la théorie de la relativité générale (section 4). Je discute la question de l'existence et de l'identité des points de l'espace-temps (ou du champ gravitationnel) dans la section 5. Cette question est en fait un aspect particulier de la question plus vaste des observables (dans un sens technique) de la théorie. Au sujet de cette question délicate, même au niveau classique, le cadre conceptuel du réalisme structural ontologique peut être pertinent (section 6). Le lien entre l'interprétation structuraliste ici présentée de l'espace-temps (et de la gravitation) et le débat contemporain entre substantialisme et relationalisme est discuté dans la section 7 ; en particulier, il est suggéré que ce débat se trouve mieux exprimé du point de vue de la relation entre espace-temps d'une part et matière d'autre part (où 'matière' doit être précisément définie – une partie du débat semble se situer au niveau de cette définition).

## 2. La représentation géométrique standard de l'espace-temps

Cette contribution peut être comprise dans une démarche analytique qui vise à élaborer une philosophie (une métaphysique) de la nature (ou de certains de ses aspects) basée sur les sciences, ici l'espace-temps tel que décrit par la relativité générale. Dans le cadre de cette démarche, il est donc indispensable d'introduire la manière avec laquelle cette théorie physique décrit l'espace-temps. Le but n'est pas ici de fournir une introduction rigoureuse à la théorie de la relativité générale. Il s'agit plutôt de mettre l'accent sur les aspects conceptuellement importants pour la suite de la discussion ; dans la mesure du possible, je vais ainsi éviter les aspects techniques et renvoie le lecteur aux ouvrages de référence standards pour de plus amples détails.<sup>2</sup>

Dans le cadre de la représentation géométrique (tensorielle) standard de la théorie de la relativité générale, l'espace-temps<sup>3</sup> est représenté par une paire  $(M, g)$ , où  $M$  est une variété

---

<sup>2</sup> Voir par exemple Hawking et Ellis (1973) et Wald (1984).

<sup>3</sup> L'espace et le temps sont considérés comme des aspects d'une seule et même entité, l'espace-temps, dont la nature est ici discutée. Ceci est une conséquence de la théorie de la relativité restreinte déjà, où l'absence d'une notion de simultanéité 'absolue' dans le sens d'une simultanéité valable pour tous référentiels impliquent que les notions d'espace et de temps ne peuvent pas être considérées du point de vue physique de manière séparée (les notions de distance spatiale ou de durée temporelle entre deux événements n'ont de sens

différentiable de dimension 4 et  $g$  est un champ métrique de Lorentz (ou simplement ‘métrique’) défini sur  $M$ . Une variété différentiable de dimension 4 peut être comprise comme un ensemble de points muni d’une structure topologique et d’une structure différentiable, qui permettent de mettre les points en relations les uns avec les autres et de les désigner localement (et de manière ‘lisse’) par 4 nombres réels (la variété  $M$  ‘ressemble’ à  $R^4$  localement). Un champ métrique de Lorentz est un objet géométrique défini en tout point de la variété et décrivant les relations chrono-géométriques et spatio-temporelles fondamentales. La métrique décrit localement la structure de cône de lumière (ou structure causale locale), permettant ainsi de distinguer les différents types de courbes (temps, espace, nul) dans l’espace-temps et donc les trajectoires possibles d’entités physiques (courbes de type temps ou de type nul) ; pour un événement donné, la métrique permet ainsi de définir l’ensemble des événements pouvant entrer en relation causale avec lui. Elle définit également la longueur des courbes dans l’espace-temps, et donc les distances spatiales et les durées temporelles (relativement à un référentiel), caractérisant le comportement ‘des règles et des horloges (idéales)’. En complément de cette signification chrono-géométrique et spatio-temporelle, le champ métrique de Lorentz décrit également les effets gravitationnels. C’est là un des points essentiels de la théorie de la relativité générale : champ gravitationnel et géométrie de l’espace-temps (les trajectoires inertielles en particulier) sont des aspects de la même entité physique, décrite par le champ métrique de Lorentz (ce fait peut être compris comme exprimant le principe d’équivalence d’Einstein). En conséquence, les trajectoires de particules tests en chute libre (sans rotation) dans un champ gravitationnel sont des géodésiques (de type temps ou nul), c’est-à-dire des trajectoires inertielles, déterminées par la métrique.<sup>4</sup> Il est important de souligner à ce stade le “rôle dual” de la métrique (selon l’expression de John Stachel 1993, 136) : d’un côté, il décrit les aspects géométriques et inertiels fondamentaux de l’espace-temps, et de l’autre, il décrit le champ gravitationnel, dynamique et satisfaisant des équations différentielles (les équations du champ d’Einstein). Ce dernier point est particulièrement important : par cette double nature, la géométrie de l’espace-temps elle-même est alors dynamique, dans le sens où elle est reliée à la distribution d’énergie-matière via les équations du champ d’Einstein. A différentes distributions d’énergie-matière correspondent différentes géométries spatio-temporelles (et vice versa).<sup>5</sup> Comme la géométrie de l’espace-temps est alors elle-même dynamique, cela signifie qu’en toute généralité, il n’y a pas d’entité physique fixe, inerte et non-dynamique par rapport à laquelle les systèmes physiques décrits par la théorie peuvent être considérés. Cet aspect fondamental de la théorie est discuté dans la section suivante.

### 3. Invariance de jauge et indépendance de fond

---

physique que par rapport à un référentiel particulier, par opposition aux intervalles spatio-temporels 4-dimensionnels).

<sup>4</sup> En toute généralité et dans une région suffisamment grande de l’espace-temps, le champ gravitationnel n’est pas homogène, de telle sorte que les géodésiques sont soumises à des accélérations relatives (et à des forces de marée) les unes par rapport aux autres. Cette accélération relative est une manière de caractériser la courbure de l’espace-temps (plus précisément, le tenseur de courbure de Riemann, via l’équation de déviation géodésique) ; dans ce sens, l’espace-temps décrit est courbe.

<sup>5</sup> L’interprétation machienne naïve de la relativité générale selon laquelle la distribution d’énergie-matière détermine entièrement la géométrie spatio-temporelle est clairement erronée : l’expression même de la distribution d’énergie-matière (via le tenseur d’énergie-impulsion) nécessite une métrique.

Une propriété fondamentale de la théorie de la relativité générale est son invariance sous les difféomorphismes actifs (propriété que, suivant Earman (2006), je nomme covariance générale substantielle).<sup>6</sup> Ceci signifie que les équations du champ d'Einstein sont invariantes sous ces transformations et que si  $(M, g)$  est une solution de ces équations, c'est-à-dire représente un espace-temps (et une configuration du champ gravitationnel), alors  $(M, d^*g)$  est aussi une solution et représente la même situation physique, avec  $d^*$  la transformation agissant sur la métrique induite par un difféomorphisme actif  $d : M \rightarrow M$ . Sans entrer dans les détails techniques, un difféomorphisme actif transforme de manière bijective chaque point de la variété en un autre de telle sorte que la structure topologique soit préservée et que certaines conditions de continuité et différentiabilité soient satisfaites ; une telle transformation active sur la variété détermine une transformation sur la métrique, aussi appelée difféomorphisme par abus de langage, qui peut être comprise comme une redistribution des propriétés métriques sur les points de la variété satisfaisant les conditions mentionnées. L'ensemble des difféomorphismes actifs possède la structure mathématique d'un groupe, que l'on note  $Diff(M)$ . Ainsi, à strictement parler, un espace-temps n'est pas représenté uniquement pas une seule paire  $(M, g)$ , mais plutôt par une classe d'équivalence de telles paires reliées par des difféomorphismes actifs.

De plus manière plus spécifique, il est possible de comprendre cet invariance sous  $Diff(M)$  comme une invariance de jauge dans le cadre des formalismes lagrangien et hamiltonien de la théorie.<sup>7</sup> Les équations dynamiques de la théorie de la relativité générale, les équations du champ d'Einstein, comme pour la plupart des théories physiques fondamentales, peuvent être dérivées d'une fonctionnelle, appelée action, caractérisant la théorie, l'action de Einstein-Hilbert dans le cas de la relativité générale. Du point de vue lagrangien et en raison des théorèmes de Noether, il est intéressant de considérer les groupes de transformations laissant l'action invariante. En passant sur les détails techniques, l'action de Einstein-Hilbert de la relativité générale est invariante sous  $Diff(M)$  et le second théorème de Noether implique alors que les équations dynamiques dérivées de l'action ne sont pas toutes indépendantes les unes des autres, de telle sorte qu'une forme de sous-détermination semble apparaître.<sup>8</sup> Une telle sous-détermination n'est cependant pas physique si l'on considère les transformations laissant l'action invariante comme des transformations de jauge, c'est-à-dire comme des transformations reliant différentes descriptions de la même situation physique. En passant à nouveau sur les nombreux détails techniques, on peut voir dans le cadre du formalisme hamiltonien (où l'on considère en gros l'évolution de données initiales plutôt que directement les solutions des équations dynamiques de la théorie) que les transformations de jauge générées par les contraintes de première classe correspondent aux difféomorphismes spatio-temporels.<sup>9</sup> Comme conséquence, les observables de Dirac de la théorie (en gros, les quantités physiquement pertinentes) sont alors des grandeurs invariantes sous ces transformations, ce qui n'est pas sans poser d'importants problèmes, tant conceptuels que techniques, comme nous le verrons plus bas (section 6).

D'un point de vue technique, il semble qu'il soit possible de rendre n'importe quelle théorie covariante et même invariante sous  $Diff(M)$ , de telle sorte que ces propriétés semblent être alors purement formelles. Depuis l'objection de Kretschmann au critère de covariance

---

<sup>6</sup> Cette appellation est en fait un peu malheureuse ; il s'agit bien ici d'invariance et non simplement de covariance (pour la distinction entre invariance et covariance voir récemment Giulini 2007 et Rickles 2008).

<sup>7</sup> Earman (2006) promeut en particulier une telle approche de l'invariance sous  $Diff(M)$ .

<sup>8</sup> Voir Brading et Castellani (2007) et les références qui y sont mentionnées.

<sup>9</sup> Pour les détails techniques voir par exemple Wald (1984, appendix E) et Isham (1993) ; dans la littérature en philosophie de la physique, voir Earman (2003) et Belot et Earman (2001).

générale d'Einstein, il y a un important débat en philosophie de la physique sur la signification physique de cette propriété.<sup>10</sup> Earman (2006) argumente que l'invariance de jauge sous  $Diff(M)$  possède bien une signification physique qui n'est pas satisfaite trivialement par toutes les théories, contrairement au critère purement formelle de covariance, selon lequel, en gros, les équations de la théorie doivent garder la même 'forme' sous les transformations de coordonnées (covariance générale formelle par opposition à la covariance générale substantielle, qui est l'invariance de jauge sous  $Diff(M)$ ).<sup>11</sup> Il n'est pas nécessaire ici de rentrer dans les détails de ce débat pour comprendre la spécificité de la représentation de l'espace-temps par la théorie de la relativité générale ; il suffit en effet de considérer non seulement l'invariance sous  $Diff(M)$ , mais également la nature fondamentalement dynamique de la métrique (du champ gravitationnel) et donc de la structure spatio-temporelle elle-même. C'est l'indépendance de fond. Il est clair qu'indépendance de fond et invariance sous  $Diff(M)$  sont fortement liés, mais la notion d'indépendance de fond souligne le fait qu'il n'existe pas d'entité physique fixe, non-dynamique par rapport à laquelle les systèmes physiques peuvent être considérés. En effet, on peut comprendre en particulier cette notion comme soulignant le fait que le champ métrique dynamique ne peut être décomposé de manière unique en une partie inertielle non-dynamique et une partie gravitationnelle dynamique, comme  $g(p) = \eta + h(p)$  par exemple, pour  $p \in M$ , où  $\eta$  représente une métrique de fond non-dynamique (c'est-à-dire une structure spatio-temporelle non-dynamique, 'support' des processus physiques, comme la métrique fixe de Minkowski par exemple) et  $h(p)$  représente le champ gravitationnel dynamique (à strictement parler, le champ métrique ne peut ainsi pas être considéré comme une perturbation sur un fond inertiel fixe, bien qu'un tel développement perturbatif est physiquement justifié dans de nombreux cas pratiques, comme dans la limite linéaire d'interaction faible, utile notamment pour l'étude des ondes gravitationnelles). Selon certains chercheurs, cette indépendance de fond de la théorie de la relativité générale est une des sources principales des difficultés rencontrées lors des tentatives de quantification de la théorie, car la théorie quantique standard présuppose en général un tel 'fond' ou 'support' spatio-temporel non-dynamique (une métrique de Minkowski par exemple).<sup>12</sup> Comme nous le verrons plus bas (section 6), cette particularité de la relativité générale pose certains problèmes interprétatifs (et techniques) au niveau de la théorie classique déjà, comme la question des observables et la question liée du changement. Il a également été argumenté que l'indépendance de fond et l'invariance sous  $Diff(M)$ , en excluant toute référence à une entité physique non-dynamique, en particulier à des points de l'espace-temps dont l'identité est non-dynamique (la 'localisation' au sens habituel), fournit un argument fort en faveur d'un relationalisme au sujet de l'espace-temps.<sup>13</sup> Bien qu'une partie du problème semble être ici

---

<sup>10</sup> Voir par exemple Norton (1993, 2003), Rynasiewicz (1999), Rovelli (2004, § 2.4.3) et Earman (2006).

<sup>11</sup> Earman (2006) argumente également que la reformulation invariante sous  $Diff(M)$  d'une théorie initialement qui ne l'est pas fournit alors une théorie différente ; en particulier, les deux théories ne vont pas avoir forcément le même ensemble d'observables.

<sup>12</sup> Dans les dernières années, la théorie de la gravité quantique à boucles a cependant rencontré un certains succès dans la quantification canonique de la relativité générale, le but étant de développer une théorie quantique du champ gravitationnel qui est indépendante de fond, voir par exemple Rovelli (2004, 2007). D'autres programmes de recherche ne considère pas cette indépendance de fond comme fondamentale, préférant comme guides d'autres 'principes' physiques ou mathématiques.

<sup>13</sup> Voir par exemple Rovelli (2004, § 2.4.2) et Smolin (2006) ; Stachel (1993) et Saunders (2003a) argumentent également que l'invariance sous  $Diff(M)$  implique une forme de relationalisme.

une question de labels et donc purement verbale, nous verrons plus bas qu'indépendance de fond et invariance sous  $Diff(M)$  n'impliquent pas forcément une position relationnaliste au sujet de l'espace-temps (section 7). Cette caractéristique de la théorie de la relativité générale semble néanmoins indiquer que les notions de relations et de structure jouent un rôle important dans l'interprétation de l'espace-temps basée sur cette théorie. Je discute dans la section suivante le cadre conceptuel pour une telle interprétation.

#### 4. Réalisme structural et espace-temps

Le réalisme structural constitue en réalité une famille (pas très homogène) de positions en philosophie des sciences. Dans le débat récent, on distingue habituellement, suivant James Ladyman (1998), deux versions du réalisme structural, une version épistémique principalement due à John Worrall (1989) et une version ontologique principalement due à Steven French et Ladyman (2003). Le réalisme structural épistémique est une conception avant tout épistémologique dans le sens où elle considère que tout ce que l'on peut connaître est la structure du monde, où la notion de structure doit être précisée (Worrall 1989 reste relativement vague à ce sujet, évoquant ce qui est représenté par les équations mathématiques de nos meilleures théories scientifiques).<sup>14</sup> Le but principal du réalisme structural épistémique est clairement de fournir une conception réaliste robuste pouvant tenir compte à la fois de l'argument réaliste du miracle (selon lequel le succès empirique de nos meilleures théories scientifiques seraient un miracle si elles n'étaient pas au moins approximativement vraies) et de l'argument anti-réaliste de l'induction pessimiste (selon lequel, par induction sur les théories scientifiques du passé, il y a de fortes chances pour que nos meilleures théories scientifiques actuelles soient fausses). Très brièvement, l'idée est d'argumenter qu'il y a une continuité au niveau du contenu structural des théories scientifiques successives, si bien que, pour tenir compte de l'argument de l'induction pessimiste, il faut se restreindre à ce contenu structural de nos meilleures théories scientifiques actuelles. En d'autres termes, selon cette conception, on ne peut connaître que la structure formée par les objets dans le monde et non pas leur nature, comme leurs propriétés intrinsèques ; cette conception reconnaît donc aux objets dans le monde une nature intrinsèque inconnaissable. Cependant, cette distinction entre nature et structure est problématique : dans le cadre d'une théorie scientifique donnée, il semble difficile de distinguer clairement entre ce qui est la description de la structure (à laquelle s'applique l'argument du miracle) et ce qui est la description de la nature des objets (à laquelle s'applique l'argument de l'induction pessimiste).<sup>15</sup>

Il n'est pas nécessaire de discuter plus en avant cette version du réalisme structural, car le but ici n'est pas de développer une position dans le débat sur le réalisme scientifique, mais plutôt de fournir une métaphysique pour la physique contemporaine fondamentale, en particulier pour la théorie de la relativité générale. Il est important de souligner que le réalisme structural épistémique, en tant que tel, ne remet pas en cause ce que j'appelle la vision métaphysique (atomiste) standard du monde, selon laquelle, en gros, le monde est constitué d'individus, comme des particules élémentaires, qui possèdent des propriétés et une identité intrinsèques et qui se trouvent mis en relation spatio-temporelle les uns avec les autres. Une telle conception du monde est remise fondamentalement en question par la théorie quantique (dans sa version 'standard'), où les systèmes quantiques intriqués ne possèdent pas d'identité et d'individualité intrinsèques (basées sur des propriétés qualitatives), de telle sorte qu'ils ne peuvent être

---

<sup>14</sup> La notion de structure est comprise parfois en termes logiques et formels, à l'aide de phrases de Ramsey par exemple. La notion de structure utilisée par la suite est au contraire concrète.

<sup>15</sup> Voir Psillos (1999, ch. 7).

considérés indépendamment les uns des autres (et en particulier indépendamment des relations d'intrication dans lesquelles ils entrent). Le réalisme structural ontologique a pour ambition de prendre en compte ces aspects fondamentaux de la théorie quantique et, de manière plus générale, de fournir un cadre interprétatif rigoureux à la physique fondamentale contemporaine. Le réalisme structural ontologique est la thèse métaphysique selon laquelle il n'y a dans le monde que des structures, où la notion de structure doit être précisément définie. Cette notion de structure fait l'objet d'un intense débat dans la littérature autour du réalisme structural ontologique. Dans leur proposition originale, French et Ladyman (2003) semblent argumenter en faveur d'une notion radicale de structure, selon laquelle la notion de structure n'est comprise qu'en termes de relations, sans relata, sans objets. Dans cette version éliminativiste radicale, le réalisme structural ontologique nie l'existence des objets comme entités fondamentales et ne reconnaît dans le monde à strictement parler que des relations et des structures purement relationnelles (sans relata) : ce que nous croyons être des objets ou relata fondamentaux se trouvent être en dernier ressort des structures et des relations.<sup>16</sup> Bien que motivée de façon justifiée par les difficultés croissantes en physique fondamentale contemporaine d'identifier des objets 'bien définis', c'est-à-dire avec une identité et une individualité intrinsèques, cette version éliminativiste radicale du réalisme structural ontologique fait face à une objection majeure : dans la mesure où le réalisme structural ontologique est une conception au sujet des relations et structures dans le monde physique, il semble que de telles relations physiques concrètes dans le monde se trouvent nécessairement instanciées entre des relata (des objets) physiques.<sup>17</sup> Cependant, en tant que thèse métaphysique, le réalisme structural ne se trouve en rien obligé de nier l'existence des objets et des relata. Revenons à l'argument empirique provenant de la physique quantique : ce qu'il y a de particulier avec les systèmes quantiques, c'est la difficulté de définir une identité et une individualité intrinsèques, c'est-à-dire une identité indépendante des autres systèmes quantiques et des relations dans lesquelles ils entrent (comme la relation d'intrication quantique). Ainsi, pour rendre compte de ces aspects fondamentaux de la physique quantique, il suffit de développer une notion d'objet dont l'identité n'est pas intrinsèque, n'est pas fondée sur ses propriétés intrinsèques, mais est structurale et contextuelle.<sup>18</sup> Une structure est alors un réseau concret de relations physiques entre des relata (objets) physiques ne possédant ni

---

<sup>16</sup> Pour une affirmation radicale explicite sur l'élimination des objets, voir French (1998) ; voir également Saunders (2003b).

<sup>17</sup> Cette objection a été soulevée par nombre d'auteurs, parmi lesquels Cao (2003), Chakravartty (2003), Busch (2003), Psillos (2006). Il est clairement possible de considérer des relations abstraites sans relata, transformant le réalisme structural ontologique en une forme de platonisme. Cette possibilité est explicitement rejetée par French (2006) : il s'agit pour le réalisme structural ontologique de rendre compte des structures physiques dans le monde telles que décrites par la physique fondamentale.

<sup>18</sup> Ladyman (2007) et Ladyman et Ross (2007, ch. 7) ont récemment proposé de manière moins radicale non plus d'éliminer les objets et les relata de notre ontologie, mais de les considérer comme 'dérivés' ou 'constitués' des relations et structures ontologiquement premières. A partir de considération sur des graphes, Dipert (1997) peut être compris comme soutenant une position analogue. Cette notion de priorité ontologique des relations est cependant un peu obscure et risque de ne pas répondre entièrement à l'objection mentionnée ci-dessus (au niveau fondamental ou 'ontologiquement premier', il semble qu'il y ait alors toujours des relations sans relata).

identité intrinsèque ni propriétés intrinsèques,<sup>19</sup> de telles sorte qu'il n'y a pas de priorité ontologique entre relations et relata, les deux étant donnés 'en même temps' (ontologiquement parlant). Cette version modérée du réalisme structural ontologique n'est pas soumise à l'objection majeure mentionnée ci-dessus, dans le sens que les relations physiques sont bien instanciées entre des relata physiques, bien que ceux-ci ne soient rien d'autre que les relations dans lesquelles ils entrent.<sup>20</sup> L'identité d'un objet (relata) fondamental est alors structurale ou contextuelle dans le sens qu'elle ne peut être définie indépendamment des relations dans lesquelles ils entrent et indépendamment de la structure dont il fait partie. Bien qu'une telle conception des objets soit en complet décalage par rapport à la conception métaphysique standard présentée ci-dessus, elle n'est en rien incohérente. Comme déjà mentionné, le réalisme structural ontologique considère des structures physiques et donc des relations physiques instanciées dans le monde ; ces relations physiques sont aussi concrètes et déterminées que des propriétés intrinsèques peuvent l'être et dans la mesure où ces dernières peuvent fournir des conditions d'identité (comme dans la théorie de l'identité des objets en termes de 'faisceau' de propriétés) il n'y pas de raison de penser que les relations (ou propriétés relationnelles) ne peuvent pas le faire également (de ce point de vue, propriétés intrinsèques et relationnelles sont sur le même niveau).

Ce réalisme structural ontologique a été proposé comme interprétation convaincante des systèmes quantiques intriqués et de leur non-séparabilité.<sup>21</sup> Il s'agit ici de discuter cette conception structuraliste comme cadre interprétatif de l'espace-temps tel que représenté par la théorie de la relativité générale ; en particulier, il s'agit de discuter dans quelle mesure cette conception tient compte de la propriété fondamentale d'indépendance de fond.<sup>22</sup> Il est clair que la représentation géométrique standard de l'espace-temps et du champ gravitationnel dans le cadre de la relativité générale peut être naturellement interprétée comme décrivant l'espace-temps et le champ gravitationnel comme une structure physique dans le sens d'un réseau de relations physiques entre des relata physiques.

Ces relations physiques sont les relations spatio-temporelles et gravitationnelles fondamentales décrites par le champ métrique (relations chrono-géométriques et inertio-gravitationnelles). Les relata de cette structure peuvent être compris, du moins dans une première approche, comme les points de l'espace-temps. Deux arguments sont en général avancés en faveur des points de l'espace-temps. La physique fondamentale contemporaine de la matière (la théorie quantique des champs) ainsi que la relativité générale sont des théories de champs. De par leur représentation mathématique en termes de fonctions sur l'espace-temps, les champs physiques sont communément compris en termes d'attribution de certaines propriétés aux points (ou aux régions) de l'espace-temps concernés. Il semble ainsi que la notion même de champ physique nécessite la notion de point (ou région) de l'espace-temps, de telle sorte que tout engagement ontologique envers des champs physiques semble impliquer un engagement ontologique envers les points (ou régions) de l'espace-temps.<sup>23</sup>

---

<sup>19</sup> Le point important ici est le rejet de l'identité intrinsèque pour les objets fondamentaux ; la question des propriétés intrinsèques reste encore ouverte (certaines propriétés semblent en effet fondamentalement intrinsèques, comme la charge par exemple).

<sup>20</sup> Au sujet de ce réalisme structural ontologique modéré, voir Esfeld et Lam (2008). Si aucun autre qualificatif n'est employé, c'est à cette version que je fais dorénavant référence lorsque je parle de réalisme structural ontologique.

<sup>21</sup> Voir Esfeld (2004).

<sup>22</sup> Le réalisme structural ontologique modéré comme interprétation de l'espace-temps tel que décrit par la relativité générale est développé dans Esfeld et Lam (2008).

<sup>23</sup> Un argument de ce type est parfois attribué à Harry Field (1980, 35) ; voir aussi Earman (1989, 155-159).



Cependant, un tel argument repose fortement sur une formulation mathématique particulière de la théorie de la relativité générale, la formulation géométrique standard en termes d'objets géométriques comme des champs tensoriels définis sur une variété différentiable (voir section 2). Or, la théorie de la relativité générale peut être formulée de manière équivalente dans le cadre d'autres formalismes mathématiques ne présupposant pas une variété différentiable sur laquelle les champs se trouvent définis.<sup>24</sup> A ce stade et d'un point de vue interprétatif, il semble qu'il n'y ait pas de raisons évidentes de privilégier un formalisme plutôt qu'un autre ; tout en gardant à l'esprit cette limitation, je me situe néanmoins pour cette contribution dans le cadre du formalisme géométrique standard.

Le deuxième argument en faveur des points de l'espace-temps est l'existence des solutions purement gravitationnelles des équations du champ d'Einstein (pas de d'énergie-matière non gravitationnelle) ; dans ce cas au moins, les relations spatio-temporelles sont trivialement instanciées entre des points de l'espace-temps. Ceci ne constitue néanmoins pas un argument décisif en faveur de l'existence des points de l'espace-temps. Une partie de la question dépend de l'interprétation du champ métrique-gravitationnel, considéré comme une entité fondamentalement spatio-temporelle ou non (dans ce dernier cas, l'espace-temps peut être compris comme la "manifestation d'un champ physique particulier, le champ gravitationnel", voir Rovelli 1997, 193). Une partie du débat contemporain standard entre substantialisme et relationalisme concerne l'existence des points de l'espace-temps, reconnue par les uns et niée par les autres, et donc dépend également de l'interprétation du champ métrique-gravitationnel. Par soucis de simplicité, je considère dans un premier temps des solutions ou des régions sans énergie-matière non-gravitationnelle (le rapport entre espace-temps, gravitation d'un côté et énergie-matière non-gravitationnelle de l'autre est discuté dans la section 7) et je parle en général de points de l'espace-temps au lieu de 'relata gravitationnels'.

Dans le cadre de la théorie de la relativité générale, l'espace-temps peut donc être compris comme une structure physique dans le sens d'un réseau de relations spatio-temporelles entre des points de l'espace-temps (l'espace-temps n'est rien d'autre que cette structure physique concrète). Dans ce cadre, la question est maintenant de savoir quelle est la nature de ces objets (relata) physiques que sont les points de l'espace-temps ; en particulier, la question est dans quelle mesure les relations spatio-temporelles déterminent l'identité des points de l'espace-temps. Comme je vais le discuter dans la section suivante, la propriété d'indépendance de fond (et d'invariance sous  $Diff(M)$ ) possède une importance fondamentale pour cette question.

## 5. Identité structurale des points de l'espace-temps

En vertu de cette invariance sous  $Diff(M)$  discuté en section 3, si  $(M, g)$  représente une structure spatio-temporelle, alors  $(M, d^*g)$  représente la même situation physique, la même structure spatio-temporelle, où  $d^*$  est un difféomorphisme (induit) actif. Cette invariance implique que les points de l'espace-temps (les relata de la structure spatio-temporelle) ne

---

<sup>24</sup> Dans le cadre de la formulation algébrique de la théorie de la relativité générale, on définit la variété différentiable ainsi que tous les objets géométriques nécessaires à la formulation de la théorie en considérant comme structure fondamentale l'anneau (commutatif) formé par ce que l'on considère dans la formulation géométrique standard comme les fonctions différentiables réelles sur  $M$  et qui sont maintenant considérés comme des éléments primitifs ; les points de  $M$  sont alors définis en termes de ces fonctions et non l'inverse ! Voir par exemple la discussion dans Butterfield et Isham (2001, §2.2) ; Bain (2006) discute différentes formulations mathématiques de la relativité générale.

peuvent pas être directement représenté par les points de la variété  $M$ ,<sup>25</sup> car le cas contraire viole la covariance générale substantielle : dans le cas général, on a en effet  $g(p) \neq d^*g(p)$  de telle sorte que  $(M, g)$  et  $(M, d^*g)$  ne représentent alors pas la même situation physique (dans cet exemple, le ‘point de l’espace-temps’  $p \in M$  instancie des propriétés métriques distinctes). En outre une telle interprétation implique une forme d’indéterminisme grave : on peut par exemple imaginer un difféomorphisme (induit)  $d^*$  qui est la fonction identité pour  $t \leq t_0$  et diffère (de manière lisse) de l’identité pour  $t > t_0$  de telle sorte que  $(M, g)$  et  $(M, d^*g)$  sont identiques jusqu’à  $t_0$  ( $d^*g = g$  pour  $t \leq t_0$ ) et divergent ensuite ( $d^*g \neq g$  pour  $t > t_0$ ), où, pour l’argument, la topologie de  $M$  admet l’existence d’un temps cosmique  $t$ . Un tel indéterminisme est inacceptable dans le sens qu’il est le fruit uniquement de l’interprétation des points de la variété  $M$  comme représentant directement les points de l’espace-temps physique. Ceci constitue en substance le célèbre argument du trou élaboré originalement par Einstein, puis repris dans le cadre du débat contemporain par Stachel (1980) et John Earman et John Norton (1987). Si l’on considère que seule la variété  $M$  peut représenter l’espace-temps (et si l’on considère en particulier que le champ métrique-gravitationnel  $g$  est un champ physique comme les autres et donc ne fait pas partie de la description de l’espace-temps), alors cet argument et, de façon plus générale l’invariance sous  $Diff(M)$ , tend à montrer que les points de l’espace-temps n’existent pas.<sup>26</sup> Or, comme nous l’avons vu dans les sections 2 et 3, l’espace-temps est représenté par une classe d’équivalence de paires  $(M, g)$  de telle sorte que cette l’invariance sous  $Diff(M)$  n’exclut pas l’existence de points de l’espace-temps, mais exclut en revanche que ces points possèdent une identité intrinsèque indépendamment du champ métrique-gravitationnel (en particulier, l’invariance sous  $Diff(M)$  exclut une identité intrinsèque primitive, une ‘haeccéité’, pour les points de l’espace-temps).<sup>27</sup> En effet, si l’on considère que l’identité des points de l’espace-temps est entièrement déterminée par les relations spatio-temporelles (et gravitationnelles), représentées par le champ tensoriel métrique de Lorentz, dans lesquelles ils entrent, alors cette identité est invariante sous  $Diff(M)$  et  $(M, g)$  et  $(M, d^*g)$  représentent bien alors bien la même situation physique. Les points de l’espace-temps n’ont alors ni propriétés intrinsèques ni identité intrinsèque, mais possèdent une identité structurale ou contextuelle, déterminée par la structure spatio-temporelle, par le réseau de relations spatio-temporelles dans lequel ils entrent. Il semble donc que le réalisme structural ontologique (dans sa version modérée) fournit bien ici un cadre interprétatif adapté et convaincant : la représentation géométrique standard de l’espace-temps ainsi que la covariance générale substantielle au sens de l’invariance sous  $Diff(M)$  suggèrent que l’espace-temps est une structure physique concrète au sens du réalisme structural ontologique (modéré), c’est-à-dire dans le sens d’un réseau de relations physiques entre des relata physiques ne possédant pas d’identité intrinsèque. Points et relations de l’espace-temps se trouvent alors au même niveau ontologique, il n’y a pas de priorité ontologique entre points et relations de l’espace-temps. Une relation spatio-temporelle, en tant que relation physique concrète dans le monde, ne peut être considérée indépendamment des relata physiques (points de l’espace-temps) entre lesquels elle est instanciée et de même un point de l’espace-temps ne peut être considéré indépendamment des relations spatio-temporelles dans lesquelles il entre. Ainsi, cette conception de la structure spatio-temporelle et en particulier l’identité structurale des points de l’espace-temps rend bien compte de l’invariance sous  $Diff(M)$ . L’identité structurale des points de l’espace-temps est déterminée par les relations spatio-temporelles

<sup>25</sup> Un telle interprétation littérale de  $M$  est appelée ‘substantialisme de la variété’ dans la littérature, voir Earman et Norton (1987).

<sup>26</sup> Voir par exemple Rovelli (2004, §2.3.2).

<sup>27</sup> Cette conclusion est largement acceptée dans la littérature : voir Stachel (1993), Hofer (1996), Dorato (2000), Saunders (2003a), Pooley (2006).

décrites par le champ métrique-gravitationnel, qui est un champ dynamique, satisfaisant les équations du champ d'Einstein ; dans ce sens, l'identité des points de l'espace-temps est dynamique (se trouve modifiée de solutions en solutions). L'interprétation structuraliste de l'espace-temps rend donc également bien compte de l'indépendance de fond de la théorie de la relativité générale : dans la mesure où l'identité des points de l'espace-temps est structurale et dynamique, la localisation d'un système physique ou l'instanciation d'une propriété physique en un point de l'espace-temps implique une localisation par rapport à la structure dynamique de l'espace-temps ou par rapport au champ gravitationnel dynamique. Par leur identité dynamique, les points de l'espace-temps ne constituent donc en aucun cas une structure fixe, non dynamique.

Une implémentation concrète de cette conception d'identité structurale et dynamique des points de l'espace-temps, dans le cas purement gravitationnel, est la procédure de Bergmann et Komar, qui permet de définir une telle identité pour chaque point de l'espace-temps à l'aide de quatre champs scalaires non nuls, indépendants et invariants, construits à partir du champ métrique-gravitationnel, et de ses premières et deuxièmes dérivées.<sup>28</sup> Dans le cas des structures spatio-temporelles sans symétrie, cette procédure fournit alors un ensemble distinct de quatre nombres réels pour chaque point de l'espace-temps, qui se trouvent ainsi individualisés de manière physique (indépendamment de tout système de coordonnées), relationnelle et dynamique (le champ métrique-gravitationnel décrit des relations spatio-temporelles et gravitationnelles et est un champ physique dynamique satisfaisant les équations du champ d'Einstein). Il est clair que cette procédure dégénère en présence de symétries (plusieurs points de l'espace-temps peuvent alors être 'individualisés' par exactement les mêmes ensembles de nombres). Bien que l'extrême majorité des solutions des équations d'Einstein ne possèdent pas de symétries, certaines physiquement importantes sont hautement symétriques. Ainsi les solutions de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker, qui constituent le modèle standard en cosmologie, sont spatialement homogènes et isotropes. Dans les cas avec symétries, il semble qu'aucune propriété physique, intrinsèque ou relationnelle, ne peut fournir en général des conditions d'identité bien définies pour les points de l'espace-temps.<sup>29</sup> Cependant, dans le cadre du réalisme structural ontologique (modéré) au sujet de l'espace-temps, il n'y a pas de priorité ontologique entre les points de l'espace-temps et les relations spatio-temporelles : les deux se trouvent ontologiquement 'donnés en même temps', de telle sorte que la diversité (pluralité, distinction) numérique (contextuelle) des points de l'espace-temps est alors également donnée, de manière primitive. Cette diversité numérique primitive des points de l'espace-temps est une conséquence de la nature même de la structure spatio-temporelle. Il doit être clair que cette diversité numérique (contextuelle) primitive est radicalement différente d'une individualité intrinsèque primitive (en termes d'haecécités par exemple) ; elle n'implique en particulier pas qu'une simple permutation d'individus engendre un monde différent.<sup>30</sup> La présence de symétrie dans la structure spatio-temporelle ne pose donc pas de problème pour l'interprétation structuraliste.

---

<sup>28</sup> Voir par exemple Bergmann et Komar (1960) ; Lusanna et Pauri (2006a, b) développent cette procédure dans le cadre de la formulation hamiltonienne avec contraintes de la relativité générale ; Dorato et Pauri (2006) interprètent cette démarche dans le cadre du réalisme structural.

<sup>29</sup> Dans la mesure où n'importe quel couple de points de l'espace-temps satisfait une relation (à deux places) symétrique et non réflexive, les points de l'espace-temps sont faiblement discernables et leur identité peut être fondée sur une version faible du principe de Leibniz d'identité des indiscernables, voir Saunders (2003a).

<sup>30</sup> Voir Ladyman (2007).

## 6. Structure des observables

La question discutée dans la section précédente de la localisation dynamique dans le cadre de la relativité générale est directement liée à la question des observables de la théorie et de leur évolution ou changement ('observable' possède ici un sens technique précis, qui n'est cependant pas nécessaire pour la discussion, et peut être compris comme désignant une grandeur physique pertinente). Comme nous l'avons vu dans la section précédente, dans le cadre de la relativité générale, la localisation par rapport aux points de l'espace-temps et donc en particulier par rapport aux instants du temps n'est plus une localisation par rapport à une entité fixe, non-dynamique, extérieure aux systèmes physiques étudiés, rôle joué par l'entité 'temps' en mécanique newtonienne et quantique par exemple (qui ne sont donc pas 'indépendantes de fond'). L'évolution temporelle devient alors évolution par rapport à une entité physique dynamique et devient ainsi multiple, l'évolution pouvant être considérée par rapport à différentes entités physiques : bien qu'on choisisse dans bien des cas le champ gravitationnel (en particulier dans l'approximation d'une configuration fixe du champ métrique-gravitationnel), ce dernier ne peut fournir une notion d'évolution univoque, de manière évidente pour le cas de l'évolution du champ gravitationnel lui-même. L'évolution temporelle des observables n'est alors plus définie de manière non ambiguë. De manière très succincte, ceci constitue le problème du temps et du changement dans la théorie classique de la relativité générale ainsi que dans les tentatives de quantification canonique de la théorie.<sup>31</sup> Il existe diverses réactions face à cette question, qui peuvent être grossièrement ranger en deux catégories selon que l'indépendance de fond (et l'invariance sous  $Diff(M)$ ) est considérée comme une propriété fondamentale ou non. Parmi la première catégorie (celle qui nous intéresse ici), une conception importante discutée dans la littérature est celle développée (notamment) par le physicien Carlo Rovelli et suivant laquelle, sans entrer dans les détails et de manière très approximative, les observables de la relativité générale sont des grandeurs relatives exprimant des relations entre des grandeurs dynamiques qui ne sont eux-mêmes pas des observables (ces grandeurs sont appelées des 'observables partielles' ; considérées isolément, elles ne sont pas invariantes sous  $Diff(M)$ ). Une telle conception des observables peut être interprétée de manière convaincante dans le cadre du réalisme structural ontologique tel que considéré dans cette contribution :<sup>32</sup> les observables de la théorie forment une structure dans laquelle les relata (les observables partielles) ne peuvent être considérés indépendamment des relations dans lesquelles ils entrent (ils ne sont pas invariantes sous  $Diff(M)$ ). Il n'y a pas de priorité ontologique entre relata (observables partielles) et relations (corrélations entre observables partielles). Dans le cadre de cette interprétation structuraliste, il est possible de considérer différentes notions d'évolution (non spécifiquement temporelle) de ces corrélations, c'est-à-dire d'une grandeur dynamique par rapport à une autre (sans qu'aucune ne soit privilégiée) ; nous avons alors évolution et changement sans recourir à des entités fixes et non dynamiques, c'est-à-dire en accord avec l'indépendance de fond de la théorie.<sup>33</sup>

---

<sup>31</sup> Voir Isham (1993) ; dans la littérature philosophique, voir Belot et Earman (2001) ainsi que le débat entre Earman (2002) et Maudlin (2002) ; voir également Rickles (2006).

<sup>32</sup> Cette interprétation structuraliste de la conception de Rovelli est développée par Rickles (2006).

<sup>33</sup> Rickles (2006) donne l'exemple de l'évolution (non temporelle) de l'observable formée par la corrélation entre le volume d'une hypersurface compacte (observable partielle) et la densité de matière sur une hypersurface compacte (observable partielle), où la densité de matière joue le rôle d'horloge physique (ce choix étant arbitraire).

## 7. Métaphysique de l'espace-temps

L'interprétation structuraliste de l'espace-temps (et des observables) discutée dans cette contribution est une conception métaphysique de l'espace-temps. En tant que telle, il est alors légitime de se demander quel est le lien entre cette conception structuraliste et le débat standard entre substantialisme et relationalisme au sujet de l'espace-temps, héritier contemporain (plus ou moins légitime) du débat traditionnel entre Newton et Leibniz.<sup>34</sup> Dans une certaine mesure, le débat actuel souffre d'une certaine ambiguïté dans les termes (ainsi les similarités semblent plus importantes que les différences entre le 'relationalisme non réductif' de Saunders 2003a et le 'substantialisme sophistiqué' de Pooley 2006). Dans le but de clarifier le débat et son lien avec le réalisme structural ontologique au sujet de l'espace-temps, je propose de considérer ce débat dans le cadre plus large du rapport entre espace-temps d'un côté et matière de l'autre. On peut ainsi dégager trois conceptions (il n'y a pas de prétention historique dans l'attribution des noms).<sup>35</sup>

- Le substantialisme newtonien : l'espace-temps est considéré comme une entité existant de manière indépendante et possédant ses propres propriétés, qui ne sont pas réductibles à celles de la matière. L'espace-temps et la matière sont deux entités ontologiquement distinctes.
- Le relationalisme leibnizien : l'espace-temps consiste en des propriétés de la matière et des relations entre de la matière. On peut distinguer deux versions. Dans la version conservatrice, l'espace-temps consiste en des relations spatio-temporelles irréductibles entre de la matière, qui sont alors ontologiquement dépendantes de la matière (mais cependant ontologiquement distinctes). Dans la version réductive, l'espace-temps est réduit à des propriétés et des relations (non spatio-temporelles !) de la matière.
- Le substantialisme cartésien-spinoziste : la matière est réduite à l'espace-temps ; les propriétés et relations de la matière sont réduites à des propriétés et des relations spatio-temporelles. Matière et espace-temps forment la même entité substantielle.

Un aspect important du débat se situe au niveau de l'interprétation du champ métrique-gravitationnel. Comme nous l'avons discuté plus haut, ce dernier possède un statut particulier quant à la distinction traditionnelle entre espace-temps d'un côté et matière de l'autre : le champ métrique gravitationnel possède à la fois des aspects spatio-temporels (il décrit les relations spatio-temporelles fondamentales) et matériels (il satisfait des équations différentielles, possède énergie et quantité de mouvement). Dans le cadre du réalisme structural ontologique, ce champ métrique-gravitationnel est interprété comme une structure physique dans le sens d'un réseau de relations physiques entre des relata physiques ne possédant pas d'identité intrinsèque indépendante de la structure dans laquelle ils se trouvent. Suivant l'interprétation privilégiée du champ métrique-gravitationnel, il semble alors que cette structure peut être considérée comme spatio-temporelle (comme je l'ai fait dans cette contribution, avant tout pour des raisons de simplicité) ou matérielle. Dans le premier cas, la structure spatio-temporelle est considérée comme une entité substantielle, existant de manière indépendante (substantialisme newtonien ou cartésien-spinoziste). Dans le second cas, le champ métrique-gravitationnel, interprété comme une structure physique, est un champ physique ontologiquement similaire aux autres champs physiques fondamentaux, comme le champ électromagnétique ; l'espace-temps est alors considéré comme réduit à ce champ physique matériel (relationalisme leibnizien).<sup>36</sup> Il ne s'agit cependant pas uniquement d'une

---

<sup>34</sup> Pour une introduction et un classique sur le débat actuel, voir Dainton (2001) et Earman (1989).

<sup>35</sup> Voir Esfeld et Lam (2008, §4).

<sup>36</sup> Cette interprétation est notamment défendue par Rovelli (1997, 2004, 2007).

question de labels,<sup>37</sup> et des arguments peuvent être avancés en faveur d’une interprétation ou de l’autre.<sup>38</sup> En particulier, des arguments empiriques provenant du développement d’une théorie quantique du champ gravitationnel peuvent jouer un rôle important dans ce débat. Ainsi dans le cadre de la théorie quantique à boucles (quantification canonique du champ gravitationnel), Rovelli argumente que “la plupart des propriétés ‘spatiales’ et ‘temporelles’ du champ gravitationnel sont probablement perdues” (2007, 1307). Le but n’est cependant pas ici d’entrer dans les détails de ce débat. Le point important à souligner est que l’interprétation structuraliste, en tant que telle, est neutre quant au rapport entre espace-temps et matière ; les arguments dans ce dernier débat tournent autour de l’interprétation de la nature du champ métrique-gravitationnel et sont, à strictement parler, indépendants de la conception structuraliste développée dans cette contribution.<sup>39</sup>

## 8. Conclusion

J’ai argumenté dans cette contribution que le réalisme structural ontologique tel que présenté dans la section 4 fournit une interprétation convaincante de l’espace-temps et du champ gravitationnel tels que décrits par la théorie classique de la relativité générale. En particulier, dans le cadre de cette conception, la notion d’identité structurale ou contextuelle des relata dans la structure rend compte de manière convaincante des propriétés fondamentales d’indépendance de fond et d’invariance (de jauge) sous les difféomorphismes actifs ; elle permet en effet de considérer une notion de localisation spatio-temporelle dynamique, qui ne nécessite pas d’entité physique fixe et non dynamique. L’argument du trou et le problème du temps et du changement, qui constituent différents aspects du problème de l’interprétation de l’invariance sous  $Diff(M)$ , sont compris de manière cohérente dans ce cadre structuraliste. J’ai reformulé le débat standard entre substantialisme et relationalisme du point de vue du rapport entre espace-temps et matière ; sous cet angle, le réalisme structural ontologique au sujet de l’espace-temps et du champ gravitationnel est neutre dans ce débat.

Le but du réalisme structural ontologique tel que présenté ici est de fournir une métaphysique pour la physique contemporaine fondamentale. Je me suis volontairement restreint à l’interprétation de l’espace-temps (et du champ gravitationnel) tel que décrit par la théorie classique de la relativité générale. Si plusieurs aspects de la théorie classique demandent encore à être clarifiés et interprétés de manière convaincante, comme les aspects non-locaux de l’énergie gravitationnelle, un travail futur est de considérer dans quelle mesure cette conception structuraliste permet de rendre compte d’éventuels aspects quantiques de l’espace-temps et du champ gravitationnel, tels que décrits de manière encore incomplète par les diverses théories en développement dans le domaine.

---

<sup>37</sup> Voir Disalle (1994, §7).

<sup>38</sup> Par exemple, les spécificités du champ métrique-gravitationnel par rapport aux autres champs physiques peuvent être évoquées en faveur d’une interprétation spatio-temporelle : en particulier, le champ métrique doit être partout non nul et interagit avec tous les autres champs physiques (et avec toute énergie-matière en général), voir Hofer (1996, 13).

<sup>39</sup> Dans le cadre du débat standard tel que défini ici, j’ai argumenté que l’interprétation structuraliste n’est pas nécessairement une forme de relationalisme, contrairement à Dorato (2008) ; de plus, contrairement à ce dernier, j’ai suggéré que ce débat standard est toujours pertinent dans le cadre de la relativité générale et que le réalisme structural ontologique ne le résout donc pas.

## Bibliographie

- J. Bain. Spacetime Structuralism. In D. Dieks, editor, *The Ontology of Spacetime*. Philosophy and Foundations of Physics Series. Vol.1. Elsevier, Amsterdam, 2006.
- G. Belot and J. Earman. Pre-Socratic Quantum Gravity. In C. Callender and N. Huggett, editors, *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale*, pages 213-255. Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- P. Bergmann and A. Komar. Poisson brackets between locally defined observables in general relativity. *Physical Review Letters*, (4):432-433, 1960.
- K. Brading and E. Castellani. Symmetries and invariances in classical physics. In J. Butterfield and J. Earman, editors, *Handbook of the Philosophy of Science*. Vol. 2: *Philosophy of Physics*, pages 1331–1368. Elsevier, Amsterdam, 2007.
- J. Busch. What structures could not be. *International Studies in the Philosophy of Science*, 17:211-225, 2003.
- J. Butterfield and C. Isham. Spacetime and the philosophical challenge of quantum gravity. In C. Callender and N. Huggett, editors, *Physics meets philosophy at the Planck scale*, pages 33-89. Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
- T. Cao. Can we dissolve physical entities into mathematical structure? *Synthese*, 136(1):51-71, 2003.
- A. Chakravartty. The structuralist conception of objects. *Philosophy of Science*, 70:867-878, 2003.
- B. Dainton. *Time and Space*. Acumen, Chesham, 2001.
- R. Dipert. The Mathematical Structure of the World: The World as Graph. *Journal of Philosophy*, 94(7):329-358, 1997.
- R. Disalle. On dynamics, indiscernibility, and spacetime ontology. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 45:265-287, 1994.
- M. Dorato. Substantivalism, relationism, and structural spacetime realism. *Foundations of Physics*, 30:1605-1628, 2000.
- M. Dorato. Is Structural Spacetime Realism Relationism in Disguise? The supererogatory nature of the substantivalism/relationism debate. In D. Dieks, editor, *Ontology of Spacetime*. Philosophy and Foundations of Physics Series. Vol.2, pages 17-37. Elsevier, Amsterdam, 2008.
- M. Dorato and M. Pauri. Holism and Structuralism in Classical and Quantum General Relativity. In D. Rickles, S. French, and J. Saatsi, editors, *The Structural Foundations of Quantum Gravity*, pages 121-151. Oxford University Press, Oxford, 2006.
- J. Earman. *World Enough and Space-Time*. Absolute versus Relational Theories of Space and Time. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1989.
- J. Earman. Thoroughly Modern McTaggart: Or, What McTaggart Would Have Said if He Had Read the General Theory of Relativity. *Philosophers Imprint*, 2(3), 2002.
- J. Earman. Ode to the Constrained Hamiltonian Formalism. In K. Brading and E. Castellani, editors, *Symmetries in Physics : Philosophical Reflections*, pages 140-162. Cambridge University Press, Cambridge, 2003.
- J. Earman. Two Challenges to the Requirement of Substantive General Covariance. *Synthese*, 148(2):443-468, 2006.

- J. Earman and J. Norton. What Price Spacetime Substantivalism? The Hole Story. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 38(4):515-525, 1987.
- M. Esfeld. Quantum entanglement and a metaphysics of relations. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 35:601-617, 2004.
- M. Esfeld and V. Lam. Moderate structural realism about space-time. *Synthese*, 160:27-46, 2008.
- H. Field. *Science without numbers*. Princeton University Press, Princeton, 1980.
- S. French. On the Withering Away of Physical Objects. In E. Castellani, editor, *Interpreting Bodies: Classical and Quantum Objects in Modern Physics*, pages 93-113. Princeton University Press, Princeton, 1998.
- S. French. Structure as a weapon of the realist. *Proceedings of the Aristotelian Society*, 106:169-187, 2006.
- S. French and J. Ladyman. Remodelling Structural Realism: Quantum Physics and the Metaphysics of Structure. *Synthese*, 136(1):31-56, 2003.
- D. Giulini. Some remarks on the notions of general covariance and background independence. In I.-O. Stamatescu and E. Seiler, *Approaches to Fundamental Physics: An Assessment of Current Theoretical Ideas*. Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- S. Hawking and G. Ellis. *The Large Scale Structure of Space-Time*. Cambridge University Press, Cambridge, 1973.
- C. Hofer. The Metaphysics of Space-Time Substantivalism. *The Journal of Philosophy*, 93(1):5-27, 1996.
- C. Isham. Canonical Quantum Gravity and the Problem of Time. In L. Ibort and M. Rodriguez, editors, *Integrable Systems, Quantum Groups, and Quantum Field Theories*, pages 157-288. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1993.
- J. Ladyman. What is structural realism? *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 29(3):409-424, 1998.
- J. Ladyman. On the Identity and Diversity of Objects in a Structure. *Proceedings of the Aristotelian Society Supplementary Volume*, 81(1):45-61, 2007.
- J. Ladyman and D. Ross (with D. Spurrett and J. Collier). *Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized*. Oxford University Press, Oxford, 2007.
- L. Lusanna and M. Pauri. The Physical Role of Gravitational and Gauge Degrees of Freedom in General Relativity - I: Dynamical synchronization and generalized inertial effects. *General Relativity and Gravitation*, 38(2):187-227, 2006a.
- L. Lusanna and M. Pauri. The Physical Role of Gravitational and Gauge Degrees of Freedom in General Relativity - II: Dirac versus Bergmann observables and the objectivity of space-time. *General Relativity and Gravitation*, 38(2):229-267, 2006b.
- T. Maudlin. Thoroughly muddled McTaggart or how to abuse gauge freedom to create metaphysical monstrosities. *Philosophers Imprint*, 2(4), 2002.
- J. Norton. General covariance and the foundations of general relativity: eight decades of dispute. *Reports on Progress in Physics*, 56(7):791-858, 1993.
- J. Norton. General covariance, gauge theories, and the Kretschmann objection. In K. Brading and E. Castellani, editors, *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*. Cambridge University Press, Cambridge, 2003.
- O. Pooley. Points, Particles and Structural Realism. In D. Rickles, S. French and J. Saatsi, editors, *The Structural Foundations of Quantum Gravity*, pages 83-120. Oxford University Press, Oxford, 2006.
- S. Psillos. *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*. Routledge, London, 1999.
- S. Psillos. The structure, the whole structure and nothing but the structure? *Philosophy of Science (Proceedings)*, 73:560-570, 2006.



- D. Rickles. Time and Structure in Canonical Gravity. In D. Rickles, S. French and J. Saatsi, editors, *The Structural Foundations of Quantum Gravity*, pages 152-195. Oxford University Press, Oxford, 2006.
- D. Rickles. Who's Afraid of Background Independence ? In D. Dieks, editor, *Ontology of Spacetime. Philosophy and Foundations of Physics Series. Vol. 2*, pages 133-152. Elsevier, Amsterdam, 2008.
- C. Rovelli. Halfway through the Woods: Contemporary Research on Space and Time. In J. Earman and J. Norton, editors, *The Cosmos of Science*, pages 180-223. Pittsburgh University Press, Pittsburgh, 1997.
- C. Rovelli. *Quantum Gravity*. Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- C. Rovelli. *Quantum Gravity*. In J. Butterfield and J. Earman, editors, *Handbook of the Philosophy of Science. Vol. 2: Philosophy of Physics. Pages 1287-1329*. Elsevier, Amsterdam, 2007.
- R. Rynasiewicz. Kretschmann's Analysis of Covariance. In J. Renn, J. Ritter and T. Sauer, editors, *The Expanding Worlds of General Relativity*, pages 431-462. Birkhaeuser, Boston, 1999.
- S. Saunders. Indiscernibles, General Covariance, and Other Symmetries: The Case for Non-Reductive Relationalism. In A. Ashtekar, D. Howard, J. Renn, S. Sarkar, and A. Shimony, editors, *Revisiting the Foundations of Relativistic Physics: Festschrift in Honour of John Stachel*. Kluwer, Dordrecht, 2003a.
- S. Saunders. Structural realism, again. *Synthese*, 136:127-133, 2003b.
- L. Smolin. The Case for Background Independence. In D. Rickles, S. French and J. Saatsi, editors, *The Structural Foundations of Quantum Gravity*, pages 196-239. Oxford University Press, Oxford, 2006.
- J. Stachel. Einstein's search for General Covariance. Read at the 9th International Conference on General Relativity and Gravitation, Jena, 1980.
- J. Stachel. The Meaning of General Covariance: The Hole Story. In J. Earman, I. Janis, G. Massey, and N. Rescher, editors, *Philosophical Problems of the Internal and External Worlds: Essays on the Philosophy of Adolf Gruenbaum*, pages 129-160. University of Pittsburgh Press, Pittsburgh, 1993.
- R. Wald. *General relativity*. University of Chicago Press, Chicago, 1984.
- J. Worrall. Structural Realism: The Best of Both Worlds? *Dialectica*, 43(1-2): 99-124, 1989.