

Gravitation étendue : Quelques aspects et mises en perspective

Aurélien Barrau

*Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie
Grenoble Universités, CNRS, IN2P3*

Après une brève introduction qualitative à la théorie d'Einstein, tentant d'en souligner les fondements et les enjeux, les modèles de gravitation étendue sont présentés (ainsi que leurs corrélats et les principaux tests expérimentaux associés) et mis en perspective. En conclusion, quelques remarques quant à la pertinence épistémologique et philosophique de ces hypothèses sont suggérées.

Afin de ne pas compromettre la rigueur du propos, on ne s'est pas interdit le recours à un minimum de formalisme mathématique mais celui-ci est exclusivement cantonné aux notes de bas de page.

CONTEXTE GLOBAL ET THEORIE CADRE

Outre sa position sociologiquement très singulière et la quasi canonisation de son auteur, la théorie de la relativité générale jouit d'un statut particulièrement enviable au sein du corpus de la physique contemporaine. Rares sont en effet les modèles qui répondent conjointement et de façon si éloquente aux critères de réfutation (la relativité générale est soumise avec succès à de très nombreux tests expérimentaux particulièrement discriminants) sans rien renier des désirs de complétude (tous les aspects du secteur gravitationnel y sont exhaustivement décrits).

D'un point de vue conceptuel, la relativité générale est vraisemblablement plus simple que la gravité Newtonienne. La proposition est évidemment paradoxale si on la considère au niveau formel (les équations relativistes sont bien sûr très complexes) mais prend tout son sens du point de vue de l'économie des notions. La simplicité, clairement, n'est pas définie de façon absolue et demeure relative aux circonstances, aux visées et au contexte. Comment nier pourtant que penser la Lune se mouvant en ligne droite, librement, dans un espace façonné par la présence de la Terre, est beaucoup plus immédiatement accessible à une lecture rationnelle des événements physiques que l'étrange supposition d'une mystérieuse force, transmise sans médiateur identifié à travers le vide ou l'éther, qui dévirait celle-ci sans cesse de son orbite naturelle de chute ? La relativité, en géométrisant, renoue avec les origines de la pensée scientifique. Elle s'affranchit du recours à d'hypothétiques inobservables dont le statut fut dès l'origine considéré comme essentiellement heuristique.

Le principe d'équivalence, en stipulant que tous les corps se meuvent identiquement dans un champ de gravitation, montre qu'il est possible de rendre compte des phénomènes par un simple effet d'accélération locale du référentiel. Ce faisant, il impose de penser la transformation vers un système-cadre non inertiel. Dans cette opération, la forme de l'intervalle établie par la relativité restreinte¹ n'a plus aucune raison de demeurer invariante. Il

¹ On peut ici rappeler que, contrairement à ce que stipulent encore beaucoup d'ouvrages introductifs, la construction de la relativité restreinte ne nécessite *pas* de supposer l'existence d'une vitesse limite pour les interactions. Celle-ci apparaît nécessairement comme une « constante de structure » de l'espace-temps eut égard au groupe de transformations de la théorie. La forme générale de l'intervalle $ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ (où $\eta_{\mu\nu}$ est le tenseur de Minkowski) et, au-delà, la matrice de Lorentz, résultent simplement des symétries fondamentales : la

faut l'écrire comme une forme quadratique générale des différentielles des coordonnées², la métrique, qui généralise le théorème de Pythagore dans un espace Riemannien rendant compte de la courbure de l'espace-temps.

La relativité générale doit alors répondre à deux questions fondamentales. D'une part, décrire le comportement des champs physiques dans un espace quadridimensionnel devenu courbe. C'est ce que permet le principe de covariance généralisé qui stipule que les lois tensorielles compatibles avec la relativité restreinte dans le référentiel en chute libre demeurent valides en relativité générale. Il suffit donc, essentiellement, de supplanter des dérivées covariantes³ aux dérivées usuelles intervenant dans les équations dynamiques pour obtenir les lois d'évolution des champs en présence de gravité. D'autre part, la relativité générale doit décrire la manière dont la masse et l'énergie génèrent la courbure. C'est l'objet des équations d'Einstein⁴. Celles-ci reposent sur un principe de construction nettement moins naturellement déductif. Il faut, en effet, dans un premier temps, introduire un tenseur (dit d'Einstein) qui rende compte de la géométrie et dont on détermine la forme par plusieurs contraintes : ne dépendre que de la métrique et du tenseur de Riemann⁵, être de second rang, s'écrire linéairement par rapport au tenseur de Riemann et présenter une divergence nulle. Presque chacune de ces hypothèses fait question et c'est, en partie, l'objet des théories de gravitation étendue que de les remettre en cause. Enfin, il faut, dans un second temps, supposer une simple proportionnalité entre le tenseur d'Einstein et le tenseur énergie-impulsion qui décrit le contenu de l'espace-temps. Ce deuxième postulat n'est, lui non plus, pas anodin et peut être contredit sans renier l'esprit global de la relativité générale.

Les conséquences épistémologiques de la relativité générale sont considérables. A un premier niveau, elle déconstruit la rupture ontologique qui séparait le contenant du contenu, l'espace de la matière, ou, métaphoriquement, l'œuvre du parergon⁶. Plus profondément, elle renoue sans doute avec un cheminement monadologique que, comme Merleau-Ponty le souligne, les « plus illustres successeurs de Leibniz n'avaient pas repris ». Certains n'hésitent pas à considérer que la relativité générale révèle en fait une véritable « loi transcendantale de l'intersubjectivité » qui pourrait ouvrir vers une pensée nouvelle de la réalité physique dépassant sa définition *stricto sensu* pour ouvrir un champ cosmologique mathématiquement

relativité restreinte fut sans doute la première théorie de jauge (*i.e.* fondée sur des invariants, en l'occurrence l'homogénéité de l'espace et du temps et l'isotropie de l'espace) de l'histoire et, plus que les effets spectaculaires de dilatation du temps ou de contraction de l'espace, c'est là son caractère radicalement révolutionnaire. Ces concepts de symétries (éventuellement dans des espaces abstraits où les « vecteurs » de base peuvent devenir des entités élémentaires) ont été très féconds en physique des particules et fondent le modèle standard des hautes énergies.

² $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ où $g_{\mu\nu}$ est le tenseur métrique.

³ Le point clé tient à ce que la dérivée d'un vecteur $\partial_\mu V^\nu$ ne forme pas un tenseur (*i.e.*, dans ce contexte, un objet se transformant correctement par changement de coordonnées) à cause du terme de dérivée seconde par rapport aux coordonnées qu'il est impossible d'annuler en espace courbe (on ne dispose que de 80 degrés de liberté pour 100 contraintes). Au contraire, la dérivée covariante définie par $D_\mu V^\nu = \partial_\mu V^\nu + \Gamma_{\mu\lambda}^\nu V^\lambda$, où $\Gamma_{\mu\lambda}^\nu$ est le symbole de Christoffel faisant intervenir les dérivées de la métrique, forme explicitement un tenseur.

⁴ $G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$ (en unités naturelles) où $G_{\mu\nu}$ est le tenseur d'Einstein représentant la géométrie et $T_{\mu\nu}$ est le tenseur énergie-impulsion représentant le contenu de l'espace-temps.

⁵ Il n'est pas utile d'exprimer explicitement le tenseur de Riemann en fonction de la métrique et de ses dérivées. On peut le définir implicitement par la variation d'un vecteur sur un contour fermé : $dV^\mu = R_{\nu\rho\lambda}^\mu V^\nu dx^\rho dx^\lambda$.

⁶ Voir à ce propos J. Derrida, *La vérité en Peinture*, Flammarion, Paris, 1978.

fondé⁷. Il n'est, en d'autres termes, pas exclu que les concepts fondateurs de la relativité générale puissent servir de prémisses à l'établissement d'une véritable *Mathesis Universalis*.

VOIES D'EXTENSION ET SIGNIFICATIONS SOUS-JACENTES

Bien que la relativité générale ait été vérifiée par de nombreuses expériences (ce qui ne saurait évidemment en aucun cas *prouver* un modèle physique) et que sa cohérence interne soit particulièrement saisissante (ce qu'on ne saurait dire de sa consœur, la théorie quantique des champs), il peut être fécond de considérer d'autres modèles de gravitation. Ces derniers sont aujourd'hui –et finalement depuis la proposition d'Einstein– l'objet d'intenses recherches. L'enjeu fondamental consiste à faire face au désir unificateur. Les forces électriques et magnétiques sont décrites dans un unique corpus par la théorie de Maxwell. Elles ont été quantifiées dans le cadre de l'électrodynamique quantique et ont rejoint les forces nucléaires faibles dans le cadre du modèle de Glashow-Salam-Weinberg. Les approches grandes unifiées –encore spéculatives– permettent une convergence conceptuelle plus large en incluant les forces nucléaires fortes. Ce schème unificateur, pourtant, semble faillir lorsqu'il est tenté d'y inclure la gravitation. Au-delà des problèmes techniques liés à la renormalisation⁸, l'incompatibilité structurale entre relativité générale et théorie quantique des champs est profonde : l'élément dynamique de la première (l'espace-temps Riemannien, déterminé par la présence de matière) est au contraire le cadre figé de référence de la seconde (l'espace-temps Minkowskien, invariant suivant ce qu'il contient). Une voie prometteuse pour pallier ces difficultés et quantifier la gravité consiste à supposer que les objets fondamentaux ne sont plus des particules mais des cordes élémentaires. La théorie des cordes est une théorie d'unification (car elle décrit toutes les entités comme des modes de vibration différents d'unique composants ultimes), une théorie quantique (par construction), une théorie gravitationnelle (car un boson sans masse de spin 2 –le graviton– apparaît spontanément dans le spectre d'excitation des cordes), une théorie globale (car le *modèle standard* de la physique des particules –et son extension supersymétrique– est tout entier contenu dans cette approche) et une théorie microscopique (elle permet, par exemple, de donner un sens à l'entropie des trous noirs⁹). De plus, les cordes présentent cette spécificité singulière de ne pas supposer une dimensionnalité de l'espace-temps fixée *a priori* de façon externe au corpus mais de déterminer cette dernière sur des critères internes et auto-fondés : l'espace-temps doit comporter 10 dimensions¹⁰ pour les supercordes¹¹. Or, précisément, lors de la réduction de ces théories décadimensionnelles à notre espace-temps usuel à 4 dimensions (trois d'espace et une de temps), la gravitation émergente n'est pas la relativité générale mais une classe

⁷ D. Parrochia, *Les grandes révolutions scientifiques du XXème siècle*, Paris, PUF, 1997, pp. 120-122.

⁸ A la différence de l'électrodynamique quantique –par exemple– où les divergences qui apparaissent dans certaines interactions peuvent être régularisées par un processus de soustraction d'infinis nommé renormalisation, la gravitation décrite comme un simple champ d'interaction ne conduit pas à des amplitudes finies pour les observables. Ceci peut s'appréhender intuitivement en gardant à l'esprit l'équivalence masse-énergie de la relativité restreinte : les gravitons échangés emportent une énergie qui doit influencer sur la géométrie via l'échange de nouveaux gravitons, et ainsi de suite dans un processus récursif divergeant.

⁹ L'entropie des trous noirs est une grandeur paradoxale : comment comprendre que les objets les plus simples de l'Univers soient ceux présentant la plus grande densité informationnelle ? Dans certains cas particuliers de trous noirs dits « superymétriques extrémaux », la théorie des cordes permet de donner un sens microphysique à cette entropie. Il est à noter que la principale approche « concurrente » de la théorie des cordes, la gravité quantique à boucles, conduit également à une évaluation correcte de l'entropie de Bekenstein si le paramètre libre (dit de Himirzi et fixant la renormalisation de la constante de Newton) est choisi à cette fin.

¹⁰ Voir 11 dans le cadre de la théorie-M obtenue en considérant la limite de certaines constantes de couplage.

¹¹ Les cordes bosoniques prévoient 26 dimensions mais seule la version supersymétrique conduisant à 10 dimensions permet de rendre compte du *modèle standard* de la physique des particules.

générique de modèles dits *scalaire-tenseur* qui constituent par conséquent la première extension digne d'intérêt.

Dans cette approche alternative à la relativité générale, la gravité n'est pas seulement médiée par un graviton de spin 2, correspondant à la métrique, mais aussi par un champ scalaire (de spin nul). Ces scalaires apparaissent génériquement dans toutes les théories extra-dimensionnelles (dont la théorie des cordes n'est qu'un exemple). Un tel *dilaton* est déjà présent dans le supermultiplet du graviton décadimensionnel et d'autres champs scalaires (nommés modules) apparaissent en lien avec les composantes de la métrique associées aux dimensions supplémentaires¹². De plus, ces théories scalaire-tenseur respectent, à la différence de la plupart des autres compétiteurs, les symétries fondamentales de la relativité générale : les lois de conservation, la « constance » des paramètres non gravitationnels et l'invariance de Lorentz locale¹³. Elles peuvent aussi satisfaire exactement le principe d'équivalence faible, même pour des scalaires sans masse.

Par ailleurs, des scalaires sont aussi requis dans l'actuel paradigme cosmologique. En particulier, l'inflation repose sur l'existence d'un champ scalaire en roulement lent dans son potentiel. Or, cette hypothèse d'un accroissement exponentiel du facteur d'échelle de l'Univers dans ses premiers instants est quasi nécessaire pour rendre compte de l'extraordinaire isotropie du fond diffus cosmologique (qui témoigne de l'homogénéité de l'Univers primordial entre des régions qui semblent causalement décorréélées) et de la presque parfaite platitude du Cosmos¹⁴. De plus, des observations récentes utilisant les supernovae lointaines, confirmées par de nouvelles mesures, montrent que l'Univers entre à nouveau dans une phase d'expansion accélérée. Bien qu'il soit possible de rendre compte de cette étonnante circonstance (la gravité Newtonienne –seule force à l'œuvre à grande échelle– étant attractive, l'Univers devrait au contraire décélérer) par l'ajout d'une constante cosmologique¹⁵ dans les équations d'Einstein, seuls les modèles scalaire-tenseur permettent d'échapper au paradoxe de l'ajustement fin nécessaire pour lui conférer sa valeur¹⁶. Un article récent dévolu à l'effet Casimir¹⁷ a d'ailleurs souligné que l'explication la plus simple visant à associer cette constante cosmologique aux fluctuations du vide n'était pas tenable puisque la troncature requise est d'ores et déjà exclue par l'expérience. Un point important en faveur des approches scalaire-tenseur.

Au-delà de ces arguments théoriques et expérimentaux, l'un des intérêts majeurs des théories scalaire-tenseur consiste à inclure la relativité générale dans une classe d'alternatives

¹² g_{mn} où m et n sont des indices référant aux dimensions supplémentaires.

¹³ L'essentiel de cette partie du document provient de : G. Esposito-Farèse, *Phi in the Sky : The quest for Cosmological Scalar Fields*, Porto, juillet 2004.

¹⁴ *Stricto Sensu* l'inflation n'est pas nécessaire pour rendre compte de cette situation. Elle permet de conférer une plus grande naturalité à des situations *a priori* improbables : d'une part, l'égalité de température de 40000 zones n'ayant aucune possibilité de thermaliser et, d'autre part, le caractère hautement spécifique de la géométrie euclidienne qui est observée (correspondant à un espace de paramètres de mesure nulle au sein des géométries Riemanniennes possibles). Demeure la question de la naturalité des conditions inflationnaires elles-mêmes qui est aujourd'hui loin d'être assurée.

¹⁵ Ce qui constitue un étonnant renversement historique : la « plus grosse bourde » d'Einstein, selon ses propres propos, revient sur le devant de la scène. Cela n'est pas sans conséquence du point de vue conceptuel puisque l'une des hypothèses fondamentales de la relativité générale (à savoir la nullité du tenseur d'Einstein en l'absence de tenseur énergie-impulsion) doit être remise en cause.

¹⁶ La densité de constante cosmologique observée est 10^{120} fois plus faible que la valeur « naturelle » attendue par une simple analyse dimensionnelle !

¹⁷ Force effective attractive, d'origine quantique, entre deux plaques conductrices extrêmement proches due à la suppression des fluctuations du vide dans l'espace interne à ces plaques.

mathématiquement cohérentes afin de comprendre quelles sont les caractéristiques du modèle qui ont été testées et celles qui ne l'ont pas été. Afin de tenir compte de la très haute précision avec laquelle le principe d'équivalence faible a été expérimentalement vérifié, il est légitime de se focaliser sur les propositions alternatives le respectant strictement. Autrement dit, l'action de la géométrie sur la matière est identique à celle considérée en relativité générale, mais la dynamique de la géométrie et la façon dont la matière la façonne peuvent différer. Tous les champs de matière, y compris les bosons de jauge, sont ainsi supposés être universellement couplés avec un tenseur symétrique de second rang. La différence fondamentale avec la relativité générale vient du terme cinétique de ce tenseur qui est maintenant un mélange d'excitations de spin 2 et de spin 0. L'écart à la relativité générale est paramétrisé¹⁸ par deux fonctions du champ scalaire additionnel $\varphi : A(\varphi)$ qui représente le couplage à la matière et le potentiel $V(\varphi)$. L'enjeu d'une part importantes des recherches contemporaines en ce domaine consiste à comprendre comment il est possible de reconstruire ces fonctions A et V quantifiant, en quelque sorte, la distance entre le modèle de gravité étendue considéré et la relativité générale.

Contraintes émanant des tests au niveau du système solaire

Un champ scalaire massif a un effet négligeable sur le mouvement des corps célestes si sa masse est grande par rapport à l'inverse de la distance entre les corps. Au contraire, si sa masse est suffisamment petite, le potentiel $V(\varphi)$ est localement négligeable et la fonction de couplage à la matière, $A(\varphi)$, peut être fortement contrainte. Pour ce faire, on utilise canoniquement deux paramètres α_0 et β_0 qui –à un niveau intuitif– renseignent respectivement sur les couplages linéaires et quadratiques entre la matière et le champ scalaire¹⁹.

D'un point de vue historique, on peut noter que le cas $\beta_0=0$ correspond à la théorie de Brans-Dicke. Au contraire, le cas $\alpha_0=0$ représente les théories qui sont perturbativement équivalentes à la relativité générale, c'est-à-dire ne conduisant à aucune déviation par rapport à celle-ci (quel que soit l'ordre en $1/c^n$) à la limite des champs faibles. Les contraintes permises par l'étude du système solaire sont de plusieurs types : avance du périhélie de Mercure, tirs laser sur la Lune, déflexion de la lumière mesurée par interférométrie à très longue base et variation temporelle des signaux de la sonde Cassini lors d'une conjonction solaire. Les dernières mises à jour de ces résultats importants conduisent à une excellente limite supérieure²⁰ sur α_0 et une quasi insensibilité au paramètre β_0 . C'est une conclusion assez naturelle dans la mesure où, précisément, ces observations concernent les champs

¹⁸ L'action s'écrit maintenant : $S = \frac{c^3}{4\pi G} \int \sqrt{-g} \left\{ \frac{R}{4} - \frac{1}{2} \partial_\mu \varphi \partial^\mu \varphi - V(\varphi) \right\} + S_{matière} [matière; \tilde{g}_{\mu\nu}]$ où les unités sont à nouveau dans le système international (c est la vitesse de la lumière et G la constante de Newton), R est le scalaire de Ricci, g le déterminant du tenseur métrique, $\tilde{g}_{\mu\nu} \equiv A^2(\varphi) g_{\mu\nu}$ avec $g_{\mu\nu}$ la métrique d'Einstein. La fonction de couplage A et le potentiel V permettent donc de quantifier l'écart à la relativité générale (où l'action ne fait pas intervenir de champ scalaire).

¹⁹ Plus exactement : $\ln A(\varphi) = \alpha_0(\varphi - \varphi_0) + \frac{1}{2} \beta_0(\varphi - \varphi_0)^2 + \dots$ ce qui signifie que α_0 représente le couplage de la matière à un scalaire et β_0 celui de la matière à deux lignes scalaires.

²⁰ $\alpha_0 \leq 0.003$ en utilisant la sonde Cassini, qui conduit aux meilleures contraintes dès lors que $\beta_0 \geq -4$.

faibles qui ne sauraient mettre en exergue des écarts perturbatifs à la relativité générale, au moins dans le cas d'une faible valeur de α_0 .

Effets non perturbatifs en champ fort et pulsars binaires

A des ordres post-Newtoniens plus élevés en $1/c^n$, un simple argument diagramatique permet de se convaincre que toute déviation par rapport à la relativité générale fait apparaître au moins deux facteurs α_0 multipliés par une série de puissances croissantes de la compacité²¹ de l'astre. Comme les contraintes précédentes imposent une faible valeur de α_0 , les théories peuvent être supposées très proches de la relativité générale à tous les ordres. Pourtant, des effets non-perturbatifs peuvent survenir en champ fort. Si la compacité d'un objet est suffisamment élevée, il peut y avoir compensation de la faible valeur de α_0 par les valeurs élevées de la série en puissances de la compacité qui la multiplie. C'est exactement ce qui survient pour une étoile à neutrons dont la compacité est voisine de 0.2 tandis qu'elle n'est que de l'ordre de 10^{-9} pour la Terre. Des arguments heuristiques simples, fondés sur un mécanisme similaire à la brisure spontanée de symétrie, montrent que pour de telles valeurs de compacité, il devient énergétiquement favorable pour l'astre de créer un champ scalaire local différent de la valeur de fond.

Les systèmes de pulsars binaires sont des outils idéaux pour étudier de tels effets en champ fort. Les pulsars émettent en effet un fin pinceau de rayonnements, comme un phare balayant l'Univers, avec une remarquable régularité lorsqu'ils sont isolés. Si un premier pulsar est maintenant en orbite autour d'un second, on dispose donc d'une horloge précise en mouvement dans l'espace-temps, autrement dit d'une situation rêvée pour sonder un modèle gravitationnel. Fondamentalement, le problème est dégénéré puisque certaines caractéristiques physiques dont dépendent directement les observables sont inconnues (en particulier les masses des objets). Pourtant, la mesure simultanée de plusieurs effets²² permet de lever cette ambiguïté et donc, au-delà de la détermination des masses, de tester le modèle gravitationnel sous-jacent. Les observables déjà disponibles conduisent à vérifier avec une exceptionnelle précision les prédictions de la relativité générale et de contraindre très fortement les effets de « scalarisation spontanée » des étoiles denses. Les dernières études portent, d'une part, sur la prise en compte réaliste de l'équation d'état de la matière nucléaire à l'intérieur des étoiles à neutron et, d'autre part, sur l'utilisation future des mesures d'ondes gravitationnelles. Ce dernier point est particulièrement important parce que de gigantesques interféromètres sont aujourd'hui en construction sur Terre (Virgo et LIGO avec des bras de quelques kilomètres) et dans l'espace (LISA avec des bras de quelques millions de kilomètres²³). Or, confirmant ainsi une impression déjà exprimée depuis quelques années au sein de la communauté scientifique, il apparaît que ces instruments géants ne seront pas en mesure de contraindre les scénarii scalaire-tenseur au-delà de ce qui est déjà faisable avec les pulsars. Cela provient avant tout de ce que de tels interféromètres ne sont pas sensibles aux

²¹ Définie par $\frac{Gm}{Rc^2}$ où m est la masse de l'objet et R son rayon.

²² Paramètre de délai temporel d'Einstein (combinant l'effet Doppler du deuxième ordre avec le décalage spectral dû au compagnon), avance du périastre et taux de variation de la période orbitale par amortissement des ondes gravitationnelles émises (effet en v^5/c^5 pour la relativité générale mais en v^3/c^3 pour les théories scalaire-tenseur).

²³ Il s'agit de mettre en évidence des variations de longueur de l'ordre du millième de millimètre entre des satellites distants de 5 millions de kilomètres ! Dans une gamme de fréquence réduite avec des Lasers ultra-stables cette mesure est envisageable sérieusement en utilisant la technologie actuelle.

éventuelles ondes d'hélicité nulle. Si leur sensibilité à la nouvelle physique est ainsi essentiellement négligeable, ils n'en demeurent pas moins viables en tant qu'observatoires gravitationnels ouvrant à une nouvelle astronomie dont on peut aisément supposer qu'elle contribuera à construire une nouvelle image du Cosmos : ce ne sont plus les rayonnements, ni même les particules, mais les variations métriques qui, pour la première fois, seront utilisées afin de sonder l'Univers.

Les tests au sein du système solaire contraignent donc fortement le couplage linéaire matière-scalaire tandis que les tests fondés sur les systèmes binaires de pulsars contraignent le couplage quadratique. Par delà cette intéressante complémentarité, il existe une troisième voie d'accès, certainement plus prometteuse encore : l'étude cosmologique.

Approche cosmologique

En cosmologie usuelle, l'approche standard consiste à supposer une forme particulière pour le potentiel du champ scalaire $V(\varphi)$ (et pour la fonction de couplage $A(\varphi)$ dans les modèles de quintessence²⁴ étendue) afin de calculer les observables et de les confronter aux mesures. Au contraire, en phénoménologie de la gravité, l'enjeu consiste à *reconstruire* le Lagrangien de la théorie à partir des données expérimentales. Or, précisément, la connaissance de deux grandeurs particulières (la distance-luminosité²⁵ D et la densité de fluctuations²⁶ δ), directement accessibles aux observations, en fonction de décalage spectral²⁷ z permet de déterminer à la fois $V(\varphi)$ et $A(\varphi)$. De façon tout à fait remarquable, la connaissance de la constante de Hubble et de la densité de matière ne sont pas même nécessaires dans cette démarche. D'un point de vue technique, il suffit de réécrire d'action des théorie scalaire-tenseur sous une forme de type Brans-Dicke²⁸ pour montrer que l'on peut reconstruire $\Phi(z)$, $U(z)$ et $\omega_{BD}(z)$ (c'est-à-dire les trois variables libres de la théorie) en fonction du décalage spectral et donc, de façon paramétrique, accéder à $U(\Phi)$ et $\omega_{BD}(\Phi)$. L'enjeu actuel concerne en particulier l'évaluation des erreurs expérimentales qui sont potentiellement conséquentes dans la mesure où les dérivées secondes des grandeurs interviennent dans les équations de détermination des paramètres. Néanmoins, le résultat fondamental demeure : la reconstruction *complète* de l'action *microscopique* est théoriquement envisageable à partir des mesures *macroscopiques* accessibles en cosmologie. Réduite à sa forme la plus épurée cette proposition n'est pas si surprenante : il est évidemment possible d'ajuster deux observations ($D(z)$ et $\delta(z)$) grâce à deux fonctions ($V(\varphi)$ et $A(\varphi)$) inconnues laissées libres. Le point délicat vient de ce que la méthode d'accès à la distance-luminosité est essentiellement fondée sur

²⁴ Littéralement : *quinte-essence*, c'est-à-dire cinquième essence, soit une nouvelle force puisque la physique usuelle ne fait appel qu'à quatre interactions.

²⁵ La distance-luminosité est définie de façon que l'intensité lumineuse d'un astre soit inversement proportionnelle au carré de celle-ci.

²⁶ $\delta_m \equiv \frac{\delta\rho}{\rho}$ est la fluctuation relative de la densité de matière.

²⁷ Le décalage spectral $z \equiv \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ représente la variation relative de longueur d'onde entre l'émission et la réception d'un rayonnement eut égard à l'expansion de l'Univers. Il donne accès à la distance si l'on suppose la loi de Hubble.

²⁸ $S = \frac{c^3}{4\pi G} \int \sqrt{-\tilde{g}} \left\{ \Phi \tilde{R} - \frac{\omega_{BD}(\Phi)}{\Phi} \partial_\mu \Phi \partial^\mu \Phi - 2U(\Phi) \right\} + S_{matière} [matière; \tilde{g}_{\mu\nu}]$ où les grandeurs

« tildées » correspondent à la métrique physique (référentiel de Jordan). Cette action définit exactement la même théorie que celle donnée à la note 17.

l'utilisation des supernovae lointaines, considérées comme des « chandelles standards », qui est entachée d'erreurs statistiques et systématiques considérables. Les dernières études laissent entendre que les futures observations à grand décalage spectral²⁹ pourront permettre de lever les dégénérescences et de discriminer entre les modèles structurellement différents aujourd'hui compatibles avec les données. Ces enjeux sont à portée des instruments prévus pour les prochaines décennies, en particulier grâce au satellite SNAP pour la mesure de D et au radiotélescope SKA pour la détermination de δ .

En parallèle à ces approches scalaire-tenseur, il existe d'autres voies d'extension de la relativité générale, en particulier via l'ajout de termes d'ordres supérieurs en courbure scalaire dans la densité Lagrangienne. Les motivations pour ces directions de recherche sont très nombreuses et reposent fondamentalement sur l'idée que la relativité générale est une théorie effective à basse énergie. D'un point de vue strictement phénoménologique, il est en effet fructueux de considérer qu'à la limite des champs faibles, c'est-à-dire dans les conditions physiques usuelles, le terme dominant est celui d'ordre le plus bas en courbure (autrement dit, la relativité générale). En revanche, en présence d'un champ fort, les termes d'ordres supérieurs cessent d'être négligeables et deviennent même dominants. Si certains travaux s'intéressent à des modèles très généraux, faisant intervenir des fonctions arbitraires du scalaire de Ricci³⁰ et des tenseurs de Ricci et de Riemann, il semble raisonnable de ne pas les considérer sérieusement dans la mesure où ils violent les principes fondamentaux de la théorie des champs en faisant apparaître un fantôme de spin 2, c'est-à-dire un graviton supplémentaire d'énergie négative qui compromet la stabilité du modèle. Pourtant, il existe une combinaison très particulière, dite de Gauss-Bonnet³¹, qui fait intervenir des termes quadratiques en Ricci et Riemann sans modifier le spectre de la théorie³². De plus, cet invariant de Gauss-Bonnet apparaît comme limite de certaines théories de cordes à basse énergie et intervient dans la théorie générale de Lovelock³³, ce qui assure que les équations de champ demeurent du second ordre (autrement dit que le nombre des conditions initiales requises n'est pas modifié) bien que les équations d'Einstein soient, autant que faire ce peut, généralisées³⁴. La gravité de Gauss-Bonnet est l'objet de nombreux développements et d'intenses recherches. Au-delà de sa pertinence en cosmologie, c'est sans doute en physique des trous noirs, c'est-à-dire en champ fort, qu'elle trouve son réel paradigme. Hélas, les trous noirs massifs et supermassifs qui peuplent notre Cosmos présentent une gravité surfacique faible (par rapport aux échelles naturelles de la physique) et ce sont donc les hypothétiques

²⁹ $z > 0.7$.

³⁰ Une fonction $f(R)$ de la seule courbure scalaire est équivalente à un degré de liberté scalaire supplémentaire dans la théorie et conduit, via une transformation conforme, à une action similaire à celle donnée en note 17.

³¹ $L_{GB} = R^{\mu\nu\rho\lambda} R_{\mu\nu\rho\lambda} - 4R_{\mu\nu} R^{\mu\nu} + R^2$ définit la densité Lagrangienne de Gauss-Bonnet en fonction des tenseurs de Ricci et de Riemann.

³² L'action la plus générale ne violant aucun principe fondamental pourrait s'écrire avec des notations implicites :

$$S = \frac{c^3}{4\pi G} \int \sqrt{-g} \left\{ \frac{R}{4} - \frac{1}{2} F(g^{\mu\nu} \gamma_{ab}(\varphi^c) \partial_\mu \varphi^a \partial_\nu \varphi^b) - V(\varphi^a) \right\} - \hbar \int \sqrt{-g} W(\varphi^a) (R^{\mu\nu\rho\lambda} R_{\mu\nu\rho\lambda} - 4R_{\mu\nu} R^{\mu\nu} + R^2) + \sum_i S_{matiere_i} [matiere_i; \tilde{g}_{\mu\nu}^i \equiv A_i^2(\varphi^a) g_{\mu\nu}].$$

³³ La théorie de Lovelock consiste à ajouter au Lagrangien des densités eulériennes D -dimensionnelles.

³⁴ Le tenseur d'Einstein n'est pas le seul qui puisse être mis en regard du tenseur énergie-impulsion. Cette démarche entend considérer une classe plus large de tenseurs rendant compte de la géométrie sans compromettre la structure globale de la théorie.

trous noirs microscopiques³⁵ qui permettent de prendre la mesure des approches de type Gauss-Bonnet. En effet, ces dernières conduisent à des solutions intéressantes au paradoxe de la fin de vie des trous noirs lors de leur évaporation³⁶ en évitant la divergence des observables et la formation d'une singularité nue. Il s'agit d'un premier pas réaliste vers les théories de gravité quantique qui demeurent inaccessibles. Les coefficients de couplage entre les champs quantiques et les trous noirs viennent d'être calculés exactement et les propriétés thermodynamiques ont été présentées dans différents types d'espaces³⁷. La structure interne des trous noirs de Gauss-Bonnet est également maintenant connue et présente une remarquable cohérence. Du point de vue méthodologique, il est important de remarquer que ces approches peuvent être tout à fait fructueuses même si les objets qu'elles décrivent utilement n'existent pas effectivement dans notre Univers. De nombreuses études récentes, donnant parfois lieux à des discussions animées aux colloques, utilisent plus volontiers les contraintes internes et les éventuelles apories qui pourraient survenir au sein des théories que la confrontation directe avec l'expérience. Ce qui, à mon sens, relève d'avantage d'un retour aux schèmes de pensée ayant conduit à l'émergence des grandes révolutions du début du vingtième siècle que d'une radicale rupture dans la genèse des modèles physiques.

BREVE MISE EN PERSPECTIVE PHILOSOPHIQUE

La relativité générale n'a jamais été mise en défaut³⁸. Elle permet de rendre compte de la totalité des phénomènes gravitationnels avec précision et élégance. Pourquoi, dans ces conditions, de si nombreuses recherches sont-elles dévolues à la construction de modèles alternatifs alors qu'aucun fait d'expérience ne le réclame ? Y a-t-il une réelle légitimité –au moins une véritable fécondité intellectuelle– à ces démarches ? Le point nodal de cette interrogation est évidemment celui du réductionnisme. Pour des raisons vraisemblablement simultanément esthétiques et heuristiques, la quête d'unification joue encore un rôle central dans l'imaginaire et la pratique effective de l'essentiel de la communauté des physiciens. Héritage paradoxalement conjoint du platonisme et du dogme des religions monothéistes, le vrai se confond non seulement avec le beau mais surtout avec l'unique. La théorie ultime de la physique, si elle existe, est donc usuellement considérée comme nécessairement singulière et totalisante. Or, depuis quelques décennies, ce schème traditionnel de pensée a subi de

³⁵ Les trous noirs présentent une gravité de surface d'autant plus élevée qu'ils sont de faible masse pour la simple raison que le champ varie en M/R^2 avec un rayon proportionnel à la masse. L'existence de trous noirs microscopiques (présentant typiquement des masses comprises entre la masse de Planck $\sim 10^{-5}$ g et celle d'une montagne terrestre $\sim 10^{15}$ g) n'est pas attendue en astrophysique. En revanche, de tels objets ont pu se former dans l'Univers primordial (conséquemment aux importantes fluctuations de densité alors présentes) ou lors de collision de particules à haute énergie (dans les scénarii à dimensions supplémentaires abaissant significativement l'échelle de Planck).

³⁶ Tandis que classiquement rien ne peut s'échapper d'un trou noir, les effets quantiques imposent au contraire qu'ils perdent leur masse. Cet effet, qui n'est quantitativement important que pour les trous noirs de faibles masses, peut être compris comme un effet de marée du champ gravitationnel du trou noir sur les paires de particules créées au voisinage de l'horizon par fluctuations quantiques du vide. L'une des particules de la paire tombe dans le trou noir tandis que l'autre s'échappe vers l'infini et apparaît donc comme un flux émanant du trou noir pour l'observateur lointain. Par conservation de l'énergie, la masse du trou noir doit diminuer. Ce processus revêt une importance considérable en physique théorique.

³⁷ En particulier de-Sitter et anti-de-Sitter, c'est-à-dire munis de constantes cosmologiques positives et négatives.

³⁸ Il a longtemps été supposé que le mystère de la matière noire pourrait être résolu sans aucune nouvelle particule par une simple modification de la théorie gravitationnelle (c'est-à-dire par une extension ou réfutation de la relativité générale). On pouvait donc y déceler un possible indice des insuffisances de la théorie d'Einstein. Or, de récentes observations de collisions de galaxies dans le domaine des rayons X montrent que cette interprétation n'est pas viable et que la théorie gravitationnelle n'est pas en défaut. De même, l'accélération observée n'est pas *stricto sensu* en désaccord avec la relativité générale.

profondes mutations. Historiquement, l'unification des phénomènes (par exemple dans les théories de Newton ou de Maxwell) a été de paire avec une diminution du nombre des paramètres libres. La sphère des possibles se trouvait contrainte par la visée globalisante : les champ électriques et magnétiques devenaient des manifestations d'un même processus sous-jacent et les arbitraires du modèle se résorbaient à mesure que les liens étaient tissés. Ce processus ne fonctionne plus. Le « modèle standard » de la physique des particules comporte plus de vingt paramètres indéterminés (c'est-à-dire extérieurs au corpus). Pourtant, son extension la plus naturelle, la supersymétrie³⁹, construite comme une théorie d'unification, comporte plus de cent paramètres libres dans sa version minimale. Au-delà, les plus récentes études montrent que la théorie des cordes, représentant une étape supplémentaire –si ce n'est ultime– dans la démarche unificatrice, engendre une quasi-infinité⁴⁰ de vides disjoints et compatibles avec ses fondements ! La pyramide s'est inversée : la diversité se révèle au cœur même de l'unification conceptuelle. La physique fait face à la contingence non plus seulement dans les faits mais aussi dans les lois.

Les extensions de la relativité générale témoignent d'une tension entre deux approches de la pluralité effective du réel physique. Le critère du rasoir d'Occam demeure central mais son lieu de pertinence ne va plus de soi : faut-il privilégier les observables ou les modèles ? Rendre la proposition complexe pour que le monde apparaisse naturel⁴¹ ou simplifier la théorie au prix d'un Univers improbable ? Car c'est bien ici l'essentiel de l'enjeu : élaborer un cadre éventuellement moins épuré (approches scalaire-tenseur, de Gauss-Bonnet, etc.) qui permette, en retour, de s'affranchir de l'arbitraire apparent du Cosmos⁴². Ces études reflètent un glissement du centre prédicatif des sciences physiques.

Dans ce déplacement épistémologique, les expériences de pensée jouent un rôle considérable. Comme mentionné à la fin du paragraphe précédent, c'est d'une telle posture que sont certainement nées la relativité restreinte⁴³, la relativité générale⁴⁴ et la mécanique quantique⁴⁵. Aujourd'hui, la recherche de paradoxes plus profonds, révélés par différentes *gedenkenexperimenten*, peut guider vers la construction d'un nouveau paradigme. Les trous noirs quantiques et le Big-Bang occupent dans cette démarche une place privilégiée bien que très décalée par rapport au protocole établi des sciences de la Nature. L'expérience continue à guider et demeure érigée en critère ultime de vérité des propositions mathématiques sur le monde mais son statut s'est dépouillé : le langage a acquis une autonomie sans précédent par rapport à ce qu'il entend décrire. Les critères internes, cohérence et complétude, se sont, dans une large mesure, substitués aux référents externes. Le monde *factuel* a non seulement perdu l'immédiateté de son évidence mais, au-delà, son existence intrinsèque fait elle-même question.

³⁹ Il s'agit de mettre en relation les bosons et les fermions par une nouvelle symétrie. Dans cette approche, prise très au sérieux par la plupart des physiciens des hautes énergies et à l'origine du développement de nombreuses expériences, chaque particule connue se verrait associée un partenaire supersymétrique. Ces derniers résistant à toutes les tentatives de détection (et la supersymétrie étant spontanément brisée), il faut les supposer dotés de masses plus élevées.

⁴⁰ Typiquement $\sim 10^{500}$.

⁴¹ Ce terme, consacré par l'usage, est assurément mal choisi : certaines articles n'hésitent pas à remettre en cause la « naturalité » de notre Univers, ce qui est un comble pour mentionner notre incapacité à le décrire !

⁴² C'est évidemment un point central de la théorie des *Multivers*.

⁴³ Suite au problème que constitue l'absence de solution aux équations de Maxwell pour un observateur qui se déplacerait à la vitesse de la lumière.

⁴⁴ Suite au problème de la description covariante de la physique dans les référentiels en chute libre.

⁴⁵ Suite au problème de la capacité calorifique finie d'une collection apparemment infinie d'oscillateurs harmoniques.

Le problème central de la légitimité d'une approche gravitationnelle étendue dans le contexte contemporain dépasse donc largement celui de l'adéquation des équations d'Einstein avec les contraintes expérimentales. C'est d'une part la question de ce que l'on attend de la *phusika* qui est ici posée et, d'autre part, celle de sa pratique et de ses modalités. Sur le premier point, toute tentative de réponse canonique est évidemment frappée de désuétude. Le problème de la *réception* se pose sans doute, en science comme en art⁴⁶, à l'aune de celui d'une définition du *sujet*. Le second point, en revanche, pourrait donner lieu à une étude anthropologique plus approfondie. Suivant l'influence de Latour et de Calon en France ou de Bloor et de Collins au Royaume-Uni, la pratique effective de ces recherches autour des modifications de la gravité, peut être considérée comme révélatrice d'une interpénétration profonde des champs scientifiques et sociologiques. Que le contexte sociétal joue un rôle dans la genèse d'une théorie scientifique, personne ne le conteste et la remarque est aussi banale qu'usée. Mais ce qui constitue sans doute l'originalité du groupe d'Edimbourg a d'avantage trait à une sensibilité nouvelle au profond humanisme de la démarche scientifique. Il ne s'agit pas de contester les modes propres et spécifiques de cette discipline, mais plutôt d'en souligner, là encore –et dans un autre registre– la contingence. Les développements scientifiques récents ne relèvent d'aucune *nécessité* objective. Ils sont fondés, de fait, par les acteurs qui les proposent. Moins, il faut l'espérer, par légitimation institutionnelle, que par une forme embryonnaire et diffuse d'attente commune encore inexprimée. Certes, s'ils sont inexacts (par exemple, s'il n'existe aucun champ scalaire de quintessence ou si le Lagrangien est exactement linéaire en courbure), ils périront, comme l'exige la démarche scientifique. Mais cette temporalité concerne tous les modèles, y compris ceux que la postérité a jugé « valides ». Eriger la relativité générale ou la mécanique quantique en dogmes immuables et éternels reviendrait exactement à les extraire du champ scientifique : elles sont, comme les théories exotiques et erronées, mortelles. Il ne s'agit certainement pas de prétendre que tout se vaille, mais de penser en termes de gradation plutôt que sur le mode des ruptures ontologiques. Les propositions nouvelles obéissent à une dynamique propre qui n'est pas exclusivement conditionnée au critère de falsifiabilité.

Face à l'apparente plurivocité du réel –fût-il considéré au travers du prisme physico-mathématique– les théories gravitationnelles alternatives sont emblématiques d'une nouvelle pratique scientifique qui rompt radicalement avec les grandes épistémologies de la première moitié du vingtième siècle (Bernard, Bachelard, Carnap, Popper). De cette distance, vraisemblablement irrévocable, qui s'est immiscé entre *le monde* et la science –devenue une activité discursive plus qu'une réelle exégèse– peut naître le plus opaque des occultismes ou les fondements d'une discipline *ré-humanisée* et *dé-sacralisée*. Se donner les moyens de choisir entre ces voies est sans doute l'un des enjeux centraux de la philosophie contemporaine des sciences physiques.

⁴⁶ On réfère plus ici à une proposition proche de celle de Hans Robert Jauss dans sa théorie esthétique qu'aux parallèles entre science et art proposés, par exemple, par Paul Feyerabend.