

## TESTER LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE, CADRE DES RÉFÉRENCES DE TEMPS ET D'ESPACE

Serge Reynaud

Parmi les avancées remarquables de la physique du xx<sup>e</sup> siècle, la relativité générale a marqué les esprits parce qu'elle a révolutionné les conceptions du temps et de l'espace qui avaient été développées par Galilée, Newton et leurs successeurs, et semblaient définitivement établies à la fin du xix<sup>e</sup> siècle. Cette nouvelle théorie de la gravitation a conduit à de nombreuses prédictions qui ont été vérifiées par des expériences de plus en plus précises menées au cours du xx<sup>e</sup> siècle. L'existence des ondes gravitationnelles, une de ces prédictions les plus spectaculaires, vient d'être démontrée directement ces dernières années.

Pourtant, les expérimentateurs continuent de mettre la relativité générale à l'épreuve, dans l'espoir avoué de la prendre en défaut. En particulier, des expériences spatiales sont spécifiquement dédiées à cet objectif. Pourquoi mettre en œuvre de nouveaux tests de la relativité générale, alors que celle-ci a passé avec succès tous ceux auxquels elle a été soumise depuis cent ans ? Avant de répondre à cette question, nous allons survoler l'histoire des tests de la théorie et des principes sur lesquels elle est fondée.

### LES PRINCIPES DE LA THÉORIE

La relativité générale est la théorie relativiste de la gravitation. Einstein en pose les fondements dès 1907, dans le premier papier de revue<sup>1</sup> qu'il écrit sur la théorie de la relativité introduite deux ans plus tôt. Ces fondements prennent la forme de principes qui sont aujourd'hui encore les piliers de la relativité générale. Le premier est le *principe de relativité*, qui généralise celui introduit en 1905 pour les lois de la cinématique et de l'électrodynamique et qui doit maintenant s'appliquer aussi aux lois de la gravitation. Le second est le *principe d'équivalence* qui généralise le principe d'universalité de la chute libre, principe déjà central dans la théorie de la gravitation depuis Galilée et Newton.

Le principe de relativité affirme que toutes les lois de la physique sont les mêmes dans tous les référentiels inertiels. Aucun de ces référentiels n'est privilégié. En particulier, le *repos*, correspondant à une vitesse nulle, n'a pas de privilège particulier par rapport au mouvement inertiel, correspondant à une vitesse uniforme. Le principe d'équivalence

---

1. A. Einstein, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 4 411 (1907), traduction française dans *A. Einstein, Œuvres choisies, 2, Relativités I*, Éditions du Seuil & Éditions du CNRS, 1993.

signifiait pour Newton l'identité de la *masse grave*, qui mesure la sensibilité d'un corps à un champ de gravité, et de la *masse inerte*, qui mesure la sensibilité du mouvement à une force exercée sur le corps. C'est grâce à cette identité que deux corps lâchés sans vitesse initiale dans un champ de gravité suivent la même trajectoire accélérée, pourvu que leur mouvement ne soit pas affecté par des forces autres que la gravité.

Einstein donne une nouvelle interprétation de ce principe dans le papier de 1907 :

« Nous allons faire l'hypothèse de la complète équivalence physique entre un champ de gravitation et l'accélération correspondante du système de référence »

et il en déduit une première conséquence nouvelle, celle d'une influence du champ de gravitation sur les horloges :

« [...] le processus mis en jeu dans l'horloge se déroule d'autant plus vite que le potentiel de gravitation est plus grand... La lumière qui vient de la surface solaire possède une longueur d'onde supérieure d'environ  $2 \cdot 10^{-6}$  à celle de la lumière émise sur Terre par des substances identiques. »

Il faudra des années de travail à Einstein pour parvenir à déduire de ces principes les équations de la relativité générale<sup>1</sup>. La théorie introduit des méthodes géométriques nouvelles pour la physique à l'époque, en identifiant la gravitation aux propriétés métriques de l'espace-temps (coordonnées  $x^\mu$ , avec  $\mu = 0$  pour la coordonnée temporelle,  $\mu = 1, 2, 3$  pour les 3 coordonnées spatiales). Les horloges idéales mesurent le temps propre le long de leur trajectoire, ce temps propre étant donné par l'intégrale  $S = \int ds$  de l'élément métrique  $ds$  avec  $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$  lui-même défini par le tenseur métrique  $g_{\mu\nu}$ . L'universalité de la chute libre devient une conséquence de cette interprétation géométrique, puisque les corps subissant la seule influence de la gravité suivent des géodésiques, c'est-à-dire les courbes qui relient deux points en extrémisant l'intégrale de temps propre  $S$ .

## LES TESTS DE CES PRINCIPES

Les conséquences expérimentales de ces principes ont fait l'objet de nombreux tests qui en ont confirmé la validité. En ce qui concerne l'effet de décalage vers le rouge (*redshift*), le test proposé par Einstein par comparaison des fréquences d'émission d'atomes situés à la surface du Soleil à celles des atomes sur Terre (citation ci-dessus) s'est révélé peu concluant. En effet, les atomes à la surface du Soleil étant chauds, donc agités, leur vitesse cause un décalage des raies par effet Doppler, qui masque celui résultant de l'effet Einstein. En 1960, Pound et Rebka de l'université d'Harvard ont résolu ce problème en utilisant les techniques de la physique quantique<sup>2</sup>. Ils ont comparé les raies d'émission des noyaux de l'isotope 57 du fer, mesurées d'une part au sol et d'autre part au sommet d'une tour du campus. Bien que le champ gravitationnel soit celui de la Terre et que la

- 
1. A. Einstein, *Annalen der Physik* 49 769 (1916), traduction française dans *A. Einstein, Œuvres choisies, 2, Relativités I*, Éditions du Seuil & Éditions du CNRS (1993).
  2. R.V. Pound and G.A. Rebka, *Phys. Rev. Letters* 4 337 (1960).

différence d'altitude ne soit que de 22,5 mètres, ils ont trouvé un décalage égal à celui prédit par la théorie, avec un niveau de précision de quelques pour cent.

D'autres succès ont suivi, utilisant les progrès spectaculaires en métrologie associés au développement des radars, de l'électronique, des horloges atomiques, de l'optique et des lasers. L'apparition des techniques spatiales a joué également un rôle décisif, l'espace devenant un lieu d'expérimentation et plus seulement d'observation. Vessot et ses collègues ont poussé à un niveau meilleur que  $10^{-4}$  la précision du test du décalage vers le rouge des fréquences d'horloges en utilisant un maser à hydrogène embarqué dans une fusée-sonde jusqu'à une altitude de 10 000 km dans le champ de gravité de la Terre<sup>1</sup>.

Le projet ACES améliorera encore cette précision en embarquant des horloges à atomes froids sur la Station spatiale internationale<sup>2</sup>. Les horloges les plus précises sur Terre aujourd'hui fonctionnent avec des atomes refroidis par laser et leurs performances seront améliorées quand elles seront emportées dans l'espace, où elles bénéficieront de la microgravité. L'horloge *Pharao* devrait atteindre dans l'espace une stabilité relative de l'ordre de  $10^{-16}$  sur une durée d'une journée. Cette précision excellente permettra de synchroniser les meilleures horloges sur la planète et d'améliorer nettement la précision du test du décalage vers le rouge ou d'autres tests de physique fondamentale<sup>3,4</sup>.

Le principe d'universalité de la chute libre avait déjà été testé par Galilée puis Newton qui avaient réalisé en particulier des expériences avec des pendules dont les masses avaient des compositions différentes. D'autres physiciens avaient poursuivi ces expériences, jusqu'à Eötvös qui atteignit à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle une précision remarquable de l'ordre de  $10^{-8}$ , en utilisant des balances de torsion. Ce test, qui présente un caractère crucial dans la relativité générale, a été amélioré à la fin du XX<sup>e</sup> siècle pour atteindre la précision extraordinaire de  $2 \times 10^{-13}$ , en utilisant des pendules de torsion dans lesquels les bruits de mesure et les perturbations sont contrôlés aussi parfaitement que possible<sup>5</sup>.

L'étude de la trajectoire de la Lune autour de la Terre permet aussi de tester le principe d'équivalence. En effet, si le Soleil n'attirait pas de la même manière la Terre et la Lune, leurs mouvements en seraient affectés. L'idée, qui remonte à Newton, est que l'espace interplanétaire offre des conditions idéales, puisqu'il n'oppose pas de résistance au mouvement. Aujourd'hui, on mesure la distance Terre-Lune par télémétrie laser avec une grande précision, en chronométrant le trajet aller-retour d'une impulsion laser. Ces mesures montrent que la Terre et la Lune vérifient le principe d'équivalence avec une précision meilleure que celle obtenue avec les pendules de torsion<sup>6</sup>.

- 
1. R.F.C. Vessot *et al*, *Phys. Rev. Letters* 45 2081 (1980).
  2. P. Laurent, D. Massonnet, L. Cacciapuoti and C. Salomon, *Comptes Rendus Physique* 16 540 (2015).
  3. C. Guerlin, P. Delva and P. Wolf, *Comptes Rendus Physique* 16 565 (2015).
  4. P. Delva, dans cet annuaire, p. 403.
  5. T.A. Wagner *et al*, *Classical and Quantum Gravity* 29 184002 (2012).
  6. V. Viswanathan *et al*, *Monthly Notices of the Royal Astron. Soc.* 476 1877 (2018).

L'universalité de la chute libre est maintenant testée avec la meilleure précision par une expérience spatiale. MICROSCOPE est un microsatellite du CNES à compensation de traînée, forcé par une technique de contrôle actif à suivre une géodésique. Il embarque des micro-accéléromètres ultrasensibles de l'ONERA qui jouent un rôle critique dans la qualité du test du principe d'équivalence<sup>1,2</sup>. Les premiers résultats<sup>3</sup> publiés en 2017 démontrent que des corps de compositions différentes tombent de façon universelle dans le vide avec une précision inégalée de  $2 \cdot 10^{-14}$ . Ce résultat repousse les limites d'une éventuelle violation du principe d'équivalence et apporte de nouvelles contraintes aux modèles théoriques généralisant la relativité générale<sup>4,5</sup>.

## L'ÉQUATION D'EINSTEIN

À côté des principes fondamentaux discutés ci-dessus, la théorie de la relativité générale contient aussi une équation  $R_{\mu\nu} - g_{\mu\nu} R/2 = (8\pi G/c^4)T_{\mu\nu}$  qui relie le tenseur de courbure de Ricci  $R_{\mu\nu}$  et sa trace  $R$  au tenseur des contraintes  $T_{\mu\nu}$  qui décrit la distribution d'énergie et d'impulsion. Cette équation d'Einstein est une équation différentielle non linéaire dont la résolution donne la variation du tenseur métrique  $g_{\mu\nu}$  dans l'espace-temps quand on connaît les sources du champ gravitationnel (le tenseur  $T_{\mu\nu}$ ).

Considérant par exemple un modèle simplifié du Système solaire avec comme seule source le Soleil traité comme une masse  $M$  ponctuelle immobile (les autres sources sont ici négligées), on obtient comme solution utilisant des coordonnées spatialement isotropes une composante métrique temporelle  $g_{00} = 1 + 2\phi + 2\phi^2 + \dots$  et des composantes spatiales diagonales  $g_{ii} = -1 + 2\phi + \dots$  (les composantes non diagonales sont nulles dans ce modèle simple). Cette solution est un développement en série dans le potentiel sans dimension  $\phi = -GM/(rc^2)$  qui reste petit devant l'unité dans le Système solaire.

Cette solution met en évidence une propriété importante de la relativité générale qui découle de principes généraux et ne contient pas de paramètre supplémentaire à ceux qu'elle hérite de la théorie de Newton, la constante  $G$  de la gravitation et la masse gravitationnelle  $M$  du Soleil, et de la relativité restreinte, la vitesse  $c$  de la lumière. Par conséquent, les prédictions théoriques de la relativité générale fournissent des valeurs précises, par exemple 43 secondes d'arc par siècle pour l'anomalie de l'avancée du périhélie de Mercure, ou 1,75 seconde d'arc pour la déflexion d'un rayon lumineux rasant le Soleil. En principe, toute mesure en désaccord avec ces valeurs devrait suffire à remettre en cause la théorie.

- 
1. P. Touboul *et al*, *Classical and Quantum Gravity* 29 184010 (2012).
  2. G. Métris, dans cet annuaire, p. 393.
  3. P. Touboul, G. Métris, M. Rodrigues *et al.*, *Phys. Rev. Letters* 119 231101 (2017).
  4. J. Bergé *et al*, *Phys. Rev. Letters* 120 141101 (2018).
  5. P. Fayet, *Phys. Rev. Letters* D 97 055039 (2018)

En pratique, les tests sont moins directs que ne le laisse supposer cette affirmation. Pour une comparaison précise entre théorie et expériences, il faut en effet un modèle plus réaliste prenant en compte en particulier les perturbations des mouvements gravitationnels déjà présents dans la théorie newtonienne. Une technique couramment utilisée pour mener à bien cette comparaison consiste à confronter les observations aux métriques paramétrisées dites post-Newtoniennes (PPN) avec  $g_{00} = 1 + 2\phi + 2\beta\phi^2 + \dots$  et  $g_{ii} = -1 + 2\gamma\phi + \dots$  (le coefficient de  $\phi$  dans  $g_{00}$  est fixé pour que  $G$  reste la constante effective dans le Système solaire). Les résultats des tests sont alors exprimés en termes d'anomalie des paramètres  $\beta$  et  $\gamma$  par rapport à la valeur unité prédite par la relativité générale.

Les nombreux tests expérimentaux réalisés depuis cent ans en utilisant des techniques variées et de plus en plus précises ont confirmé la validité des prédictions de la relativité générale<sup>1,2</sup>.

### UN STATUT PARADOXAL

Et pourtant, les tests continuent, parce qu'il existe de bonnes raisons de mettre encore la relativité générale à l'épreuve. Nous signalons rapidement dans cette conclusion quelques-unes de ces raisons, dans le domaine de la théorie d'abord, puis dans le domaine des comparaisons avec les observations aux échelles galactiques et cosmiques.

Souvenons-nous qu'Einstein a modifié la théorie de Newton, non pas parce qu'elle était contredite par les observations, mais parce qu'elle était incompatible avec le principe de relativité. L'histoire se répète aujourd'hui, puisque la théorie d'Einstein semble incompatible avec les méthodes de la théorie des champs quantiques décrivant les interactions fondamentales qui dominent le monde microscopique, la force électromagnétique et les forces nucléaires faible et forte. Pour sa part, la théorie de la gravitation reste sous sa forme actuelle une théorie des champs classiques. Ce défaut ne l'empêche pas de faire les prédictions fiables dans le monde macroscopique, mais il signale sans aucun doute une difficulté de principe.

De nombreux modèles ont été développés pour résoudre cette question cruciale de la physique et certains ont obtenu des premiers succès. Ces modèles conduisent généralement à des prédictions observables, telles que des violations apparentes du principe d'équivalence, ou des modifications des solutions des équations de la gravitation, par exemple de la loi qui exprime la force de gravité en fonction de la distance. Les expériences avec une précision accrue ou effectuées dans de nouveaux domaines sont un des moyens dont nous disposons pour tester cette *nouvelle physique* attendue au-delà de la théorie standard actuelle.

- 
1. C.F. Will, *Living Rev. Relativity*. (2014) 17:4. <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>
  2. A. Fienga, dans cet annuaire, p. 385.

Les observations aux échelles galactiques apportent également leur lot d'interrogations. Mesurées dans une galaxie telle qu'Andromède, les vitesses de rotation observées dans les parties externes dépassent celles qui sont calculées en résolvant l'équation d'Einstein avec les quantités de matière contenues dans ces galaxies, mesurées par leur rayonnement. Autrement dit, une partie importante de la matière semble échapper à la simple observation du rayonnement, c'est ce qu'on appelle le problème de la *matière noire* ou *matière sombre*<sup>1</sup>.

Le même constat semble se répéter à l'échelle de l'Univers. Pour rendre compte de la dynamique cosmique observée, les cosmologistes ajoutent deux composantes à son contenu en énergie et impulsion, l'une ayant les mêmes caractéristiques que la matière noire et l'autre ayant des caractéristiques différentes et qu'on appelle *énergie noire* ou *énergie sombre*. Ces composantes obscures, dont la nature physique précise reste inconnue, constitueraient 95 pour cent de l'Univers selon les observations cosmologiques affinées après les résultats de Planck<sup>2</sup>.

Une alternative théorique consiste à modifier les lois de la relativité générale aux échelles galactiques et cosmiques, bien plus grandes que les échelles où elles ont été vérifiées avec précision. Des idées sont aussi proposées aujourd'hui pour tester la relativité générale à ces très grandes échelles. Ces expériences mettront-elles en évidence des écarts à la relativité générale ou bien la confirmeront-elles avec une précision encore meilleure et dans un domaine d'application plus étendu ? Il est trop tôt pour le dire.

Dès 1905, Einstein considérait l'anomalie de Mercure comme un nuage dans le ciel radieux de la théorie de Newton, mais peu de physiciens partageaient cette intuition à l'époque. Les anomalies aujourd'hui repérées aux grandes échelles pourraient jouer un rôle similaire dans le futur, mais elles pourraient aussi être expliquées par des explications ne remettant pas en cause la relativité générale.

---

1. T.J. Sumner, *Living Rev. Relativity* (2002) 5:4. <https://doi.org/10.12942/lrr-2002-4>  
 2. Planck Collaboration XIV, *Astronomy & Astrophysics* 594 A14 (2016).