

# Prolifération des théories post-einsteiniennes - Formalisme paramétrisé post-newtonien (PPN)

Nicolae Sfetcu

31.12.2019

Sfetcu, Nicolae, « Prolifération des théories post-einsteiniennes - Formalisme paramétrisé post-newtonien (PPN) », SetThings (31 décembre 2019), URL = <https://www.setthings.com/fr/prolifération-des-théories-post-einsteiniennes-formalisme-paramétrisé-post-newtonien-ppn/>

Email: [nicolae@sfetcu.com](mailto:nicolae@sfetcu.com)



Cet article est sous licence Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International. Pour voir une copie de cette licence, visitez <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

Une traduction partielle de Sfetcu, Nicolae, "Epistemologia gravitației experimentale – Raționalitatea științifică", SetThings (1 august 2019), MultiMedia Publishing (ed.), ISBN: 978-606-033-234-3, DOI: 10.13140/RG.2.2.15421.61925, URL = <https://www.setthings.com/ro/e-books/epistemologia-gravitației-experimentale-raționalitatea-științifică/>

<b><u>PROLIFÉRATION DES THÉORIES POST-EINSTEINIENNES .....</u></b>	<b><u>2</u></b>
<b><u>FORMALISME PARAMÉTRISÉ POST-NEWTONIEN (PPN) .....</u></b>	<b><u>6</u></b>
<b><u>BIBLIOGRAPHIE .....</u></b>	<b><u>10</u></b>

## Prolifération des théories post-einsteiniennes

Immédiatement après l'élaboration et le succès de la relativité générale, des théories alternatives pour la gravité ont commencé à apparaître, qui peuvent se diviser en quatre grandes catégories :

<sup>1</sup>

- Théories bifurquées (dont le noyau dur est identique ou très similaire à celui de la relativité générale), ou directement liées à la relativité générale mais non bifurquées, comme les théories bimétriques Cartan, Brans-Dicke et Rosen.
- Théories unificatrices qui tentent d'unifier la mécanique quantique avec la réactivité générale (théories de la gravité quantique), comme la gravité quantique en boucles.
- Théories unificatrices qui tentent d'unifier la gravité avec d'autres forces, telles que Kaluza-Klein.
- Théories unificatrices qui tentent d'unifier plusieurs théories simultanément, comme la théorie M.

En développant ces théories, de nombreuses stratégies différentes (heuristiques positives) ont été essayées, en ajoutant de nouvelles hypothèses à la RG, en utilisant un espace-temps pour lequel l'univers est statique, des hypothèses qui éliminent les singularités gravitationnelles, etc. Dans la compétition avec la RG, il a jusqu'à présent gagné la théorie d'Einstein, prouvant de loin un pouvoir heuristique plus grand que ses rivaux. Certaines de ces théories ont été abandonnées, d'autres sont développées par diverses communautés de chercheurs, essayant d'éliminer les anomalies trouvées dans la RG, ou d'élargir la RG par bifurcation ou en tant que théories unificatrices.

Après 1980, lorsque la communauté scientifique a convenu que la RG est confirmée, généralement, seules les théories qui incluent la RG dans un cas particulier ont survécu. Une attention particulière a commencé à être accordée aux théories de la gravité quantique, en particulier la théorie des cordes. La plupart des nouvelles théories de la gravité non quantique tentent de résoudre diverses anomalies cosmologiques, telles que l'inflation cosmique, la matière noire, l'énergie noire, etc. La prolifération des anomalies de la RG ces derniers temps, y compris dans le cas Pioneer, a conduit à une renaissance des alternatives à cette théorie.

La plupart des théories de la première catégorie listées ci-dessus incluent une densité lagrangienne, une « action » (qui garantit l'existence de lois de conservation, et dont la composante gravitationnelle est déduite de la densité lagrangienne par intégration) <sup>2</sup>, et une métrique.

Les théories métriques peuvent être classées en (du plus simple au plus complexe):

---

<sup>1</sup> Timothy Clifton et al., « Modified Gravity and Cosmology », *Physics Reports* 513, n° 1-3 (mars 2012): 1–189, <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.01.001>.

<sup>2</sup> Franz Mandl et Graham Shaw, *Lagrangian Field Theory, in Quantum Field Theory* (John Wiley & Sons, 2013), 25–38.

- Théories sur les champs scalaires (inclure les théories planes conformes et les théories stratifiées avec des tranches d'espace conformes)
- Théories quasi-linéaires
- Théories tensorielles
- Théories tensorielles-scalaires
- Théories tensorielles-vectorielles
- Théories bimétriques
- Autres théories métriques

Les théories non métriques les plus importantes comprennent

- Belinfante-Swihart
- Théorie d'Einstein-Cartan
- Kustaanheimo
- Téléparallélisme
- Gravité basée sur la théorie des jauge

Certaines de ces théories sont basées sur le principe de Mach (le cadre de référence provient de la distribution de la matière dans l'univers<sup>3</sup>, considéré comme un intermédiaire entre Newton (espace et temps absolus) et Einstein (il n'y a pas de cadre de référence absolu). Des preuves expérimentales montrent que le principe Mach a tort, mais les théories connexes n'ont pas été entièrement exclues.

Afin de vérifier et de classer toutes ces théories, des tests spécifiques ont été développés, basés sur l'auto-consistance (parmi les théories non métriques comprend l'élimination des théories qui autorisent les tachyons, les pôles fantômes et les pôles d'ordre supérieur, et ceux qui ont des problèmes avec le comportement à infini), et sur la complétude (pour permettre l'analyse du résultat de chaque expérience d'intérêt). Par exemple, toute théorie qui ne peut prédire à partir des premiers principes le mouvement des planètes ou le comportement des horloges atomiques est considérée comme incomplète.

Trois tests sont considérés comme « classiques » pour la capacité des théories de la gravité à gérer les effets relativistes :

- Décalage vers le rouge gravitationnel
- Lentilles gravitationnelles (autour du Soleil)
- Avance anormale du périhélie des planètes.

A ces tests a été ajouté, en 1964, le quatrième test, appelé le délai Shapiro. Chaque théorie devrait confirmer ces tests.

---

<sup>3</sup> Alfred North Whitehead, *The Principle Of Relativity With Applications To Physical Science* (Whitefish, Mont.: Kessinger Publishing, LLC, 2008).

Le principe de l'équivalence d'Einstein (PEE), qui est également testé pour les théories relativistes de la gravité, a trois composantes :

- *Unicité de la chute libre* (principe de faible équivalence) : la masse inertielle est égale à la masse gravitationnelle
- *Invariance de Lorentz* : en l'absence d'effets gravitationnels, la vitesse de la lumière est constante
- *Invariance de la position locale* : le résultat de toute expérience locale non gravitationnelle est indépendant de l'endroit et du moment où elle est effectuée.

La conjecture de Schiff indique que toute théorie de gravité complète et cohérente qui vérifie le principe de la faible équivalence vérifie nécessairement le principe de l'équivalence d'Einstein (si la théorie a une conservation complète de l'énergie).

Les théories métriques satisfont le PEE. Seules certaines théories non métriques satisfont au PEE.

Les principales théories post-relativité générale non quantique sont la théorie de Brans-Dicke, la cinquième force et la géomérodynamique

La **théorie Brans-Dicke** est une théorie scalaire-tensorielle, dans laquelle l'interaction gravitationnelle est médiée par un champ scalaire et par le champ tensoriel de la relativité générale<sup>4</sup>. La théorie est considérée comme en accord général avec les observations. La source du champ gravitationnel est, comme dans la RG, le tenseur d'énergie de contrainte ou le *tenseur de matière*. Dans la théorie Brans-Dicke, en plus des métriques qui ont un *champ tensoriel de second rang*, il existe un *champ scalaire* qui modifie la *constante gravitationnelle* réelle en fonction de l'emplacement (c'est une caractéristique clé de la théorie, faisant partie du noyau dur). La théorie de Brans-Dick, comparée à la RG, admet plusieurs solutions. Il prédit la déviation de la lumière et la précession du périhélie planétaire, et la relativité générale peut être dérivée de la théorie de Brans-Dicke comme un cas particulier, mais Pharaon soutient que cela n'est pas valable dans toutes les situations permises par la théorie<sup>5</sup>, et certains physiciens affirment qu'il ne répond pas au principe d'équivalence fort.

La **cinquième force** est une théorie qui implique, en plus des forces gravitationnelles, électromagnétiques, nucléaires fortes et nucléaires faibles, une cinquième force pour expliquer diverses observations anormales qui ne correspondent pas aux théories existantes. Une hypothèse de cette théorie est que la matière noire pourrait être liée à une force fondamentale inconnue. D'autres spéculent qu'une forme d'énergie noire appelée quintessence pourrait être

---

<sup>4</sup> C. Brans et R. H. Dicke, « Mach's Principle and a Relativistic Theory of Gravitation », *Physical Review* 124, n° 3 (1 novembre 1961): 925–935, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.124.925>.

<sup>5</sup> Valerio Faraoni, « Illusions of general relativity in Brans-Dicke gravity », *Physical Review D* 59, n° 8 (22 mars 1999): 084021, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.59.084021>.

une cinquième force<sup>6</sup>. Une telle force fondamentale nouvelle et faible est difficile à tester. À la fin des années 1980, certains chercheurs<sup>7</sup> ont rapporté avoir découvert cette force lors de la ré-analyse des résultats de Loránd Eötvös du début du siècle, mais d'autres expériences n'ont pas réussi à reproduire ce résultat. L'un des tests qui peuvent être entrepris pour prouver la théorie est censé être basé sur le principe de l'équivalence fort (la cinquième force se manifesterait par un effet sur les orbites du système solaire, appelé effet Nordtvedt) avec Lunar Laser Ranging et interférométrie de base très longue. D'autres tests peuvent considérer des dimensions supplémentaires<sup>8</sup> ; le manteau de la terre en tant que détecteur de particules géant, se concentrant sur les géoélectrons<sup>9</sup> ; taux de pulsation des étoiles variables céphéides dans 25 galaxies<sup>10</sup> ; et ainsi de suite. Diverses hypothèses supplémentaires ont été proposées ces dernières années pour renforcer la théorie, mais aucun résultat n'a été concluant jusqu'à présent.

La **géomérodynamique** est une tentative de décrire l'espace-temps et les phénomènes associés en termes de géométrie. Il s'agit d'une théorie unificatrice, essayant d'unifier les forces fondamentales et de reformuler la relativité générale. C'est une théorie initiée par Einstein, mais toujours active. D'une certaine manière, le terme géomérodynamique est synonyme pour la relativité générale, auquel cas il est plus précisément appelé géomérodynamique d'Einstein pour désigner la formulation initiale de la valeur de la relativité générale. John Wheeler a promu cette théorie dans les années 1960, en essayant de réduire la physique à la géométrie d'une manière fondamentale, avec une géométrie dynamique avec une courbe variable dans le temps. Fondamentalement, Wheeler a essayé d'intégrer trois concepts : masse sans masse, charge sans charge et champ sans champ.<sup>11</sup>

---

<sup>6</sup> Michele Cicoli, Francisco G. Pedro, et Gianmassimo Tasinato, « Natural Quintessence in String Theory », *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2012, n° 07 (23 juillet 2012): 44, <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/07/044>.

<sup>7</sup> E. Fischbach et al., « Reanalysis of the Eotvos experiment », *Physical Review Letters* 56 (1 janvier 1986): 3-6, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.3>.

<sup>8</sup> A. J. Sanders et al., « Project SEE (Satellite Energy Exchange): Proposal for Space-Based Gravitational Measurements », *Measurement Science and Technology* 10, n° 6 (janvier 1999): 514-524, <https://doi.org/10.1088/0957-0233/10/6/317>.

<sup>9</sup> Jacob Aron, « Earth's Mantle Helps Hunt for Fifth Force of Nature », *New Scientist*, 2013, <https://www.newscientist.com/article/dn23202-earths-mantle-helps-hunt-for-fifth-force-of-nature/>.

<sup>10</sup> Bhuvnesh Jain, Vinu Vikram, et Jeremy Sakstein, « Astrophysical Tests of Modified Gravity: Constraints from Distance Indicators in the Nearby Universe », *The Astrophysical Journal* 779, n° 1 (25 novembre 2013): 39, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/779/1/39>.

<sup>11</sup> John A. Wheeler, « On the nature of quantum geometrodynamics », *Annals of Physics* 2, n° 6 (1 décembre 1957): 604-14, [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(57\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0003-4916(57)90050-7).

## Formalisme paramétrisé post-newtonien (PPN)

Dans le domaine de la gravité expérimentale, l'une des applications importantes est le formalisme. Pour l'évaluation des modèles de gravité, plusieurs séries de tests ont été proposées. Le *formalisme post-newtonien* considère les approximations des équations de gravité d'Einstein par les écarts d'ordre le plus bas de la loi de Newton pour les champs faibles. Des termes plus élevés peuvent être ajoutés pour augmenter la précision. À la limite, l'expansion post-newtonienne est réduite à la loi de gravité de Newton. Le *formalisme paramétrisé post-newtonien (PPN)* détaille les paramètres qui différencient les théories de la gravité, dans le champ gravitationnel faible et des vitesses bien inférieures à la vitesse de la lumière. PPN peut être appliqué à toutes les théories métriques de gravité dans lesquelles tous les corps satisfont au principe d'équivalence d'Einstein (PEE). La vitesse de la lumière reste constante dans le formalisme PPN et on suppose que le tenseur métrique est toujours symétrique. PPN est utilisé pour comparer et classer des métriques alternatives de gravité. Grâce à ce formalisme, de nombreuses théories auparavant considérées comme viables ont été éliminées.

Dans la *notation bêta-delta*, le comportement du champ gravitationnel faible en relativité générale est complètement caractérisé par dix paramètres post-newtoniens. Dans la notation de Will<sup>12</sup>, Misner et al.<sup>13</sup> ils ont les valeurs suivantes :

- $\Gamma$  : Quantité de courbure de l'espace  $g_{ij}$  produite par la masse au repos de l'unité
- $B$  : Combien de non-linéarité existe dans la loi de superposition pour la gravité  $g_{00}$
- $\beta_1$  : Quantité de gravité produite par l'énergie cinétique unitaire  $\rho_0 v^2/2$
- $\beta_2$  : Quantité de gravité produite par l'énergie potentielle gravitationnelle unitaire  $\rho_0/U$
- $\beta_3$  : Combien de gravité est produite par l'énergie interne unitaire  $\rho_0 \Pi$
- $\beta_4$  : Quantité de gravité produite par l'unité de pression  $p$
- $\zeta$  : Différence entre l'énergie cinétique radiale et transversale sur la gravité
- $\eta$  : Différence entre les contraintes radiales et transversales sur la gravité
- $\Delta_1$  : Quantité de glissement des cadres inertiels  $g_{0j}$  produite par la quantité de mouvement unitaire  $\rho_0 v$  ?
- $\Delta_2$  : La différence entre les quantités de mouvement radiale et transversale dans la précession Lense-Thirring des cadres inertiels

Ici,  $g_{\mu\nu}$  est le tenseur métrique symétrique 4x4 avec des indices  $\mu$  et  $\nu$  prenant des valeurs comprises entre 0 et 3. Un indice 0 indiquera la direction du temps et les indices  $i$  et  $j$  avec des valeurs de 1 à 3 indiqueront les directions spatiales. En relativité générale, les valeurs de ces paramètres sont choisies de manière à ce que, dans les limites de vitesse et de petite masse, elles coïncident avec la loi de gravité de Newton, pour assurer la conservation de l'énergie, de la

---

<sup>12</sup> C. M. Will, « Theoretical Frameworks For Testing Relativistic Gravity. Ii. Parametrized Post-Newtonian Hydrodynamics, And The Nordtvedt Effect. », *Astrophys. J.* 163: 611-28(1 Feb 1971)., 1 janvier 1971, 163, 611-28, <https://doi.org/10.1086/150804>.

<sup>13</sup> Charles W. Misner, Kip S. Thorne, et John Archibald Wheeler, *Gravitation* (W. H. Freeman, 1973).

masse, de la quantité de mouvement et de l'impulsion angulaire ; et assurer l'indépendance des équations par rapport au cadre de référence.

Pour la relativité générale,  $\gamma = \beta = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \Delta_1 = \Delta_2 = 1$  et  $\zeta = \eta = 0$ . Dans la *notation alpha-zêta* la plus récente de Will & Nordtvedt<sup>14</sup> et Will<sup>15</sup>, un ensemble différent de dix paramètres PPN est utilisé.

- $\gamma = \gamma$
- $\beta = \beta$
- $\alpha_1 = 7\Delta_1 + \Delta_2 - 4\gamma - 4$
- $\alpha_2 = \Delta_2 + \zeta - 1$
- $\alpha_3 = 4\beta_1 - 2\gamma - 2 - \zeta$
- $\zeta_1 = \zeta$
- $\zeta_2 = 2\beta + 2\beta_2 - 3\gamma - 1$
- $\zeta_3 = \beta_3 - 1$
- $\zeta_4 = \beta_4 - \gamma$
- $\xi$  est calculé à partir de  $3\eta = 12\beta - 3\gamma - 9 + 10\xi - 3\alpha_1 + 2\alpha_2 - 2\zeta_1 - \zeta_2$

$\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  et  $\alpha_3$  mesurent la magnitude des effets de cadre préféré.  $\zeta_1$ ,  $\zeta_2$ ,  $\zeta_3$ ,  $\zeta_4$  et  $\alpha_3$  mesurent l'écart par rapport à la conservation d'énergie, de la quantité de mouvement et de l'impulsion angulaire.

Dans cette notation, la relativité générale a les paramètres PPN  $\gamma = \beta = 1$  et  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \zeta_1 = \zeta_2 = \zeta_3 = \zeta_4 = \xi = 0$

Il existe une relation mathématique entre la métrique, le potentiel métrique et les paramètres PPN pour cette notation, avec dix potentiels métriques (un pour chaque paramètre PPN) pour garantir une solution unique. La méthodologie d'application du formalisme PPN aux théories alternatives de la gravité est un processus en neuf étapes<sup>16</sup>. Les limites des paramètres PPN<sup>17</sup> sont déterminées à partir de tests expérimentaux, comme suit :

---

<sup>14</sup> Kenneth Nordtvedt Jr. et Clifford M. Will, « Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity. II. Experimental Evidence to Rule Out Preferred-Frame Theories of Gravity », *The Astrophysical Journal* 177 (1 novembre 1972): 177, 757, <https://doi.org/10.1086/151755>.

<sup>15</sup> Clifford M. Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment », *Living Reviews in Relativity* 17, n° 1 (décembre 2014): 4, <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>.

<sup>16</sup> Clifford M. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*, Revised edition (Cambridge England ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993).

<sup>17</sup> Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment ».

- **Paramètre --- Limite --- Effet --- Expériment**
- $\gamma-1$  ---  $2,3 \times 10^{-5}$  --- Temporisation, déviation de la lumière --- Surveillance de Cassini
- $\beta-1$  ---  $3 \times 10^{-3}$  --- Changer le périhélie --- Changer le périhélie
- $\beta-1$  ---  $2,3 \times 10^{-4}$  --- Effet Nordtvedt avec hypothèse  $\eta_N = 4\beta - \gamma - 3$  --- effet Nordtvedt
- --- 0,001 --- La marée de la Terre --- Données gravimétriques
- $\alpha_1$  ---  $10^{-4}$  --- Polarisation des orbites --- Réflecteur mensuel
- $\alpha_2$  ---  $4 \times 10^{-7}$  --- Précession de spin --- Alignement de l'axe solaire avec l'écliptique
- $\alpha_3$  ---  $4 \times 10^{-20}$  --- Auto-accélération --- Statistiques pulsar spin down
- $\eta_N$  ---  $9 \times 10^{-4}$  --- Effet Nordtvedt --- Réflecteur mensuel
- 1 --- 0,02 --- - --- Connexions PPN combinées
- 2 ---  $10^{-8}$  --- Accélération des pulsars binaires --- PSR 1913 + 16
- 3 ---  $10^{-8}$  --- La troisième loi de Newton --- Accélération mensuelle
- 4 --- 0,006 (\*) --- - --- L'expérience Kreuzer

(\*) Basé sur  $6\zeta_4 = 3\alpha_3 + 2\zeta_1 - 3\zeta_3$  de Will. Il est théoriquement possible qu'un autre modèle de gravité contourne ce lien, auquel cas le lien est  $|\zeta_4| < 0,4$ .

*Tableau 2.1 Limites des paramètres PPN<sup>18</sup> déterminées à partir de tests expérimentaux. Source : C. M. Will<sup>19</sup>*

Le seul champ gravitationnel entrant dans les équations du mouvement est la métrique  $g$ . D'autres champs ne contribueront qu'à la génération de courbure spatio-temporelle associée à la métrique. La matière peut créer ces champs, et ils avec la matière peuvent générer des métriques, mais ils ne peuvent pas réagir directement sur la matière. La matière ne répond qu'à la métrique<sup>20</sup>. Il s'avère que la métrique et les équations du mouvement de la matière sont des entités primaires pour calculer les effets observables, et la seule distinction entre deux théories métriques est la manière particulière dont la matière et éventuellement d'autres champs gravitationnels génèrent la métrique.

À la limite post-newtonienne (mouvement lent, champ faible), la comparaison d'une théorie avec les expériences gravitationnelles et des théories entre elles est suffisamment précise pour la plupart des tests, en particulier ceux impliquant le système solaire. Les différences apparaissent dans les valeurs numériques des coefficients devant le potentiel métrique (paramètres dans le formalisme PPN).

Les paramètres  $\gamma$  et  $\beta$  sont utilisés pour décrire les tests « classiques » de la RG et sont les plus importants, les seuls paramètres non nuls dans la RG et dans la gravité scalaire-tensorielle. Le paramètre  $\xi$  est non nul dans toute théorie de la gravité qui prédit les effets de l'emplacement préféré ;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  mesure si la théorie prédit ou non les effets du cadre post-newtonien préféré;

---

<sup>18</sup> Will.

<sup>19</sup> Clifford M. Will, « Is momentum conserved? A test in the binary system PSR 1913 + 16 », *The Astrophysical Journal Letters* 393 (1 juillet 1992): L59-61, <https://doi.org/10.1086/186451>.

<sup>20</sup> Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment ».

$\alpha_3, \zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$  mesurent si la théorie prédit ou non la violation des lois globales de conservation pour la quantité totale de mouvement.

Carlton Morris Caves a conclu que les expériences en laboratoire pour étudier les caractéristiques non linéaires du champ gravitationnel, ainsi que les mesures en laboratoire de la gravité produite par l'énergie interne, sont difficiles et non concluantes<sup>21</sup>. Les expériences de laboratoire les plus accessibles du point de vue des effets post-newtoniens sont les effets de cadre préférés et l'orientation préférée (ils peuvent être modulés en faisant tourner l'ensemble de l'appareil de laboratoire par rapport à l'espace inertiel) et les effets gravitationnels de type magnétique (les effets associés à composants de la métrique  $g$ : glissement des cadres inertiels à travers les corps en rotation, précession gyroscopique Lens-Thirring, accélérations gravitationnelles produites par les interactions spin-spin des corps en rotation, et accélérations gravitationnelles dues au couplage spin-orbite). Les effets magnétiques sont plus sensibles au sens de rotation ou au mouvement d'une source ou d'un détecteur de laboratoire que les autres expériences de laboratoire. En tant que source, un corps axial symétrique à rotation rapide peut être utilisé et sa vitesse angulaire peut être modulée lentement.<sup>22</sup>

---

<sup>21</sup> Carlton Morris Caves, « Theoretical investigations of experimental gravitation » (phd, California Institute of Technology, 1979), <http://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:03152016-161054898>.

<sup>22</sup> Caves.

## Bibliographie

- Aron, Jacob. « Earth's Mantle Helps Hunt for Fifth Force of Nature ». *New Scientist*, 2013. <https://www.newscientist.com/article/dn23202-earths-mantle-helps-hunt-for-fifth-force-of-nature/>.
- Brans, C., et R. H. Dicke. « Mach's Principle and a Relativistic Theory of Gravitation ». *Physical Review* 124, n° 3 (1 novembre 1961): 925-35. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.124.925>.
- Caves, Carlton Morris. « Theoretical investigations of experimental gravitation ». Phd, California Institute of Technology, 1979. <http://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:03152016-161054898>.
- Cicoli, Michele, Francisco G. Pedro, et Gianmassimo Tasinato. « Natural Quintessence in String Theory ». *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2012, n° 07 (23 juillet 2012): 044-044. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/07/044>.
- Clifton, Timothy, Pedro G. Ferreira, Antonio Padilla, et Constantinos Skordis. « Modified Gravity and Cosmology ». *Physics Reports* 513, n° 1-3 (mars 2012): 1-189. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.01.001>.
- Faraoni, Valerio. « Illusions of general relativity in Brans-Dicke gravity ». *Physical Review D* 59, n° 8 (22 mars 1999): 084021. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.59.084021>.
- Fischbach, E., D. Sudarsky, A. Szafer, C. Talmadge, et S. H. Aronson. « Reanalysis of the Eotvos experiment ». *Physical Review Letters* 56 (1 janvier 1986): 3-6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.3>.
- Jain, Bhuvnesh, Vinu Vikram, et Jeremy Sakstein. « Astrophysical Tests of Modified Gravity: Constraints from Distance Indicators in the Nearby Universe ». *The Astrophysical Journal* 779, n° 1 (25 novembre 2013): 39. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/779/1/39>.
- Mandl, Franz, et Graham Shaw. *Lagrangian Field Theory, in Quantum Field Theory*. John Wiley & Sons, 2013.
- Misner, Charles W., Kip S. Thorne, et John Archibald Wheeler. *Gravitation*. W. H. Freeman, 1973.
- Nordtvedt, Kenneth, Jr., et Clifford M. Will. « Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity. II. Experimental Evidence to Rule Out Preferred-Frame Theories of Gravity ». *The Astrophysical Journal* 177 (1 novembre 1972): 775. <https://doi.org/10.1086/151755>.
- Sanders, A. J., A. D. Alexeev, S. W. Allison, K. A. Bronnikov, J. W. Campbell, M. R. Cates, T. A. Corcovilos, et al. « Project SEE (Satellite Energy Exchange): Proposal for Space-Based Gravitational Measurements ». *Measurement Science and Technology* 10, n° 6 (janvier 1999): 514–524. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/10/6/317>.
- Wheeler, John A. « On the nature of quantum geometrodynamics ». *Annals of Physics* 2, n° 6 (1 décembre 1957): 604-14. [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(57\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0003-4916(57)90050-7).
- Whitehead, Alfred North. *The Principle Of Relativity With Applications To Physical Science*. Whitefish, Mont.: Kessinger Publishing, LLC, 2008.
- Will, C. M. « Theoretical Frameworks For Testing Relativistic Gravity. Ii. Parametrized Post-Newtonian Hydrodynamics, And The Nordtvedt Effect. » *Astrophys. J.* 163: 611-28(1 Feb 1971)., 1 janvier 1971. <https://doi.org/10.1086/150804>.
- Will, Clifford M. « Is momentum conserved? A test in the binary system PSR 1913 + 16 ». *The Astrophysical Journal Letters* 393 (1 juillet 1992): L59-61. <https://doi.org/10.1086/186451>.

- . « The Confrontation between General Relativity and Experiment ». *Living Reviews in Relativity* 17, n° 1 (décembre 2014): 4. <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>.
- . *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*. Revised edition. Cambridge England ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993.