

TESTER LA RELATIVITÉ DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

Agnès Fienga

INTRODUCTION

La fin du XIX^e siècle a vu l'apogée de la mécanique analytique classique avec la découverte de Neptune par Le Verrier. Il restait cependant un caillou dans la chaussure de la mécanique céleste triomphante : l'anomalie du périhélie de Mercure. Cette avancée de 43 secondes de degrés par siècle ne pouvait s'expliquer que la présence d'une planète invisible et inobservable (et pour cause) située entre la Terre et le Soleil : Vulcain. C'est Einstein qui en 1912 démontrera que la mécanique céleste du XIX^e siècle reposait sur une conception erronée de l'espace et du temps et qui apportera la réponse à cette question de l'irrégularité de l'orbite de Mercure. La relativité générale et l'étude de la dynamique des planètes sont donc intrinsèquement liées depuis le début.

Bien plus tard, à la fin des années soixante, l'essor des techniques d'observations par tirs radar ont permis une amélioration importante dans la localisation dans l'espace d'objets, naturels et artificiels, et la modélisation de leur mouvement.

Les premières éphémérides de l'ère moderne furent développées au MIT dans les années soixante sur la base d'observations radar mesurant des distances Terre-Vénus et Terre-Mercure avec une précision de quelques kilomètres. À cette amélioration de la dynamique des objets du Système solaire s'est immédiatement associée l'idée de tester les modèles de gravitation, et en particulier la théorie de la relativité générale (Shapiro 1964).

ÉVOLUTION RÉCENTE DES ÉPHÉMÉRIDES PLANÉTAIRES

La précision des éphémérides planétaires a considérablement évolué depuis le début du XX^e siècle, principalement grâce aux développements de l'informatique et l'utilisation de positions angulaires acquises par des caméras numériques (CCD), des distances entre la Terre et les planètes obtenues lors de tirs radar sur leur surface et celles obtenues lors de la navigation des sondes spatiales.

Lors d'une mission spatiale, la sonde est suivie régulièrement par les équipes de navigation des agences spatiales. Ces dernières utilisent principalement le décalage en fréquence du signal radio émis depuis la Terre, captée par la sonde, puis réémise par celle-ci vers la Terre. Ce décalage induit par l'effet Doppler donne une information fondamentale sur la vitesse de la sonde vue depuis la Terre. Grâce à ces mesures, il est possible de calculer l'orbite de la sonde avec une précision allant jusqu'à quelques centimètres. Dans le cas où

la sonde orbite autour de la planète, il est alors aussi possible de calculer précisément la position de la planète par rapport à la Terre en considérant en plus des données Doppler, des mesures du temps que met le signal émis depuis la Terre pour atteindre la sonde et nous revenir. Ces deux types d'informations (Doppler et temps aller-retour) sont ce que l'on appelle les *données de suivis de sonde*. Dès les premières missions spatiales, elles ont été utilisées pour la construction d'éphémérides planétaires. Plus tard, dans les années 2000, se sont ajoutées des observations angulaires dites VLBI (*Very Long Base Interferometry*) qui mesurent l'écart en angle entre une sonde spatiale et une source de référence extragalactique (sans mouvement) et dont on connaît la position au millième de seconde de degrés. Grâce à ce repérage angulaire, on peut raccorder la sonde et la planète autour de laquelle elle orbite à un repère de référence international, l'BIERS. Ces observations angulaires sont complémentaires des données de suivis de sonde qui ne donnent qu'une information de distance. Enfin, au cours de leurs voyages interplanétaires, certaines sondes (Ulysses, Pioneer, Voyager, Cassini) ont survolé brièvement des planètes permettant une localisation extrêmement précise en un seul point instantané des planètes survolées. Uranus et Neptune ont ainsi une seule mesure de distance effectuée lors du passage de la sonde Voyager. Ces données issues du suivi des sondes spatiales constituent la grande majorité des observations utilisées pour la construction des éphémérides planétaires modernes. La répartition de ces données dans la construction des éphémérides de même que leurs précisions sont données dans la figure 1 avec une contribution significative des nouvelles données issues des missions Juno et Cassini pour Jupiter et Saturne.

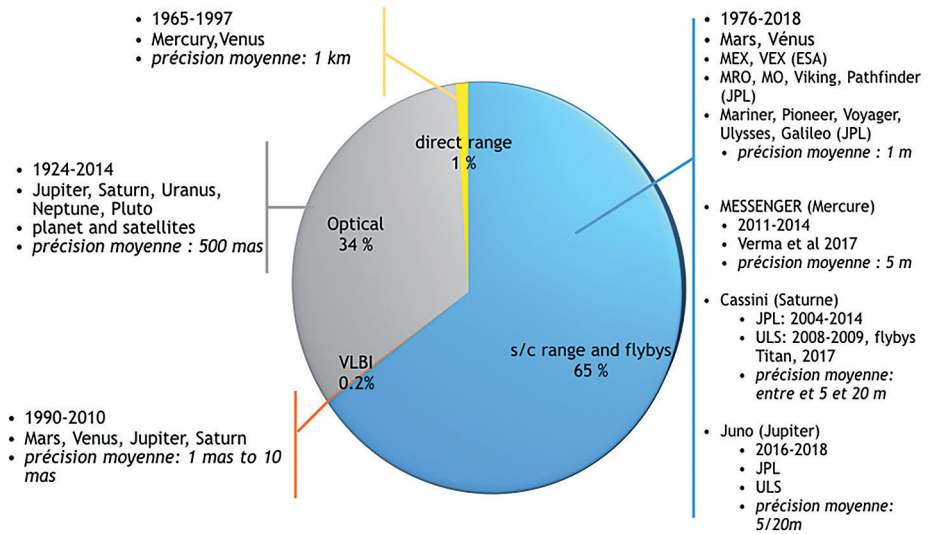


Fig. 1 – Répartition des données utilisées pour la construction d'éphémérides planétaires. Pour chaque catégorie, sont indiquées les planètes concernées, les périodes d'observations, les missions spatiales impliquées et la précision moyenne des données. Notons que pour Juno et Cassini, il existe deux consortiums analysant les données (le JPL et l'université de La Sapienza, ULS)

Les enjeux actuels soulevés par de tels gains de précision sont essentiellement liés à la nature de la gravitation (un autre modèle que la relativité générale est-il possible ?).

TESTS DE RELATIVITÉ GÉNÉRALE DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

L'année 2015 a marqué le 100^e anniversaire de la théorie de la relativité générale (GRT). Jusqu'ici, GRT a décrit avec succès toutes les observations disponibles et aucune preuve claire d'observation remettant en cause la relativité générale n'a été identifiée. Cependant, la découverte de l'énergie noire comme modèle complet pour l'univers macroscopique et l'échec continu de fusionner la GRT et la physique quantique indique que de nouvelles idées physiques devraient être cherchées. Il est alors indispensable de tester la GRT dans tous les régimes gravitationnels accessibles (champs fort avec les pulsars et champs faible dans le Système solaire) et cela avec la plus grande précision.

Parmi toutes les possibilités de tester la GRT, les tests basés sur l'étude des mouvements des objets et de la propagation de la lumière dans le Système solaire étaient historiquement les premiers avec l'explication de l'avancée du périhélie de Mercure par Einstein en 1912 et la mesure de la déflexion de la lumière par le potentiel gravitationnel du Soleil par Eddington en 1919.

En général, les tests de GRT peuvent être divisés en deux groupes : les tests du principe d'équivalence (revendiquant que la gravité peut être comprise d'une façon géométrique) et ceux des équations du champ d'Einstein (décrivant comment la géométrie spatio-temporelle est influencée par la matière).

Les violations du principe d'équivalence sont prévues par un certain nombre de théories permettant d'éviter l'appel à l'énergie noire dans les modèles cosmologiques (par exemple MOND, théorie des cordes) ou/et d'unifier la GRT avec la physique quantique (par exemple théories tenseurs-scalaires). L'universalité de chute libre, une partie importante du principe d'équivalence, est actuellement testée à un niveau d'environ 10^{-13} avec des balances de torsion et les observations de télémétrie laser à la surface de la lune.

En ce qui concerne les équations du champ d'Einstein, le cadre le plus important utilisé pour les tests dans le Système solaire est le formalisme (PPN) post-newtonien paramétrique à dix paramètres sans dimensions décrivant une certaine classe des théories métriques de gravité (Will 2006). Les paramètres les plus connus sont γ caractérisant la courbure spatio-temporelle et β qui caractérise la non-linéarité dans la loi de superposition de la gravité. Pour GRT, $\gamma = \beta = 1$.

Un bon moyen de tester la valeur de ces paramètres est l'utilisation des éphémérides planétaires qui ont fourni, comme on le verra dans le paragraphe suivant, les meilleures contraintes pour β . Les contraintes sur d'autres paramètres PPN peuvent être trouvées dans Will (2006), dont notamment celle sur γ à partir de l'analyse de données de suivis de la sonde Cassini. Des exemples typiques de modèles prévoyant

des écarts à l'unité des paramètres PPN sont un certain type de théories tenseurs-scalaires (SFT), où l'évolution cosmologique tend vers un mécanisme d'attracteur vers la GRT.

D'autres théories proposent des variations possibles des constantes de la physique comme la constante de gravitation G . Un G variant avec le temps est produit par exemple par les théories tenseur-scalaire ou par quelques modèles d'énergie noire.

Enfin, une évaluation des avances non modélées de périhélie des planètes peut aussi être utilisée pour contraindre des théories alternatives de gravité. C'est le cas de la théorie MOND produisant un effet externe au Système solaire qui peut être contraint dans le Système solaire en utilisant INPOP.

LES TESTS DE GRT AVEC LES ÉPHÉMÉRIDES PLANÉTAIRES

En 2015, l'utilisation des données issues des suivis de la sonde MESSENGER autour de Mercure et de la sonde Cassini dans le système de saturne combinées aux autres données planétaires a permis d'obtenir de nouvelles limites pour l'estimation des paramètres PPN γ , β mais aussi pour des mesures de la variation de G avec le temps et des avancées supplémentaires des périhélie de ces deux planètes (Fienga *et al.* 2015).

La combinaison d'observations issues de différentes missions et contraignant l'orbite de différentes planètes permet de limiter la propagation d'erreurs liées à chaque mission ou chaque planète individuellement.

Grâce à la précision des observations utilisées et à la cohérence du modèle dynamique planétaire, les éphémérides planétaires INPOP ont rapidement été utilisées pour donner des limites acceptables de violation de la relativité générale. Comme cela a été vu au paragraphe précédent, il existe de nombreuses théories alternatives de gravité, mais qui introduisent soit des valeurs différentes de zéro pour les paramètres PPN $\gamma-1$ et $\beta-1$ et pour des variations avec le temps des constantes de la physique et notamment de la constante newtonienne G , soit des dérivées supplémentaires des orbites planétaires. Ces phénomènes agissent comme des signatures spécifiques à chacune de ces théories. Montrer que ces signatures ne sont pas compatibles avec les observations planétaires actuelles revient donc à invalider la théorie correspondante.

La démarche d'INPOP (Fienga *et al.* 2015) a donc été de tester si une éphéméride planétaire construite en utilisant des valeurs non nulles de $\gamma-1$ et $\beta-1$, une constante G variant avec le temps (dG/dt différente de 0) ou avec des dérivées supplémentaires dans les nœuds et les périhélie ($d\varpi$ différent de 0) pouvait être significativement différente d'une éphéméride planétaire construite dans le cadre de la GRT.

Afin de déterminer quels écarts entre deux solutions sont significatifs, on considère deux versions successives d'une même famille d'éphémérides différant principalement

par l'ajout de données supplémentaires dans la construction de la solution (précision interne), de même que les écarts entre deux éphémérides construites par deux équipes différentes (précision externe). Dans ce dernier cas, il s'agit d'évaluer les différences induites par les modèles dynamiques, l'appréciation de la qualité des données utilisées, du choix des données etc...

On considère comme acceptables les valeurs de paramètres γ , β , dG/dt et $d\varpi$ à partir desquels on peut construire des éphémérides dont les écarts à l'éphéméride relativiste ($\gamma = 1$, $\beta = 1$, $dG/dt = 0$, $d\varpi = 0$) sont inférieurs aux critères de précisions interne et externe. On procède de même pour les autres paramètres dG/dt et $d\varpi$.

Dans la figure 2 sont indiquées les meilleures contraintes apportées par différentes techniques, dont celles des contraintes planétaires, pour les paramètres PPN, les variations temporelles de G . Comme on peut le voir, l'arrivée des résultats prévus des missions BepiColombo (Imperi et Iess 2017), Gaia (Hees *et al.* 2017) et MICROSCOPE (Touboul 2009) vont permettre de donner des contraintes décisives pour plusieurs classes de théories alternatives. Les contraintes apportées par les éphémérides planétaires sont néanmoins complémentaires de celles issues de missions spatiales, puisqu'elles associent huit planètes, ce qui permet de mieux séparer les effets liés aux paramètres PPN, et qu'elles combinent des observations très différentes, ce qui permet de moyennner les erreurs systématiques que pourrait induire un type d'observation en particulier.

On note enfin, spécifiquement pour les contraintes sur le paramètre de non-linéarité de la superposition de la gravité β , des valeurs très fortes obtenues par les simulations des missions BepiColombo (Imperi et Iess 2017) et Gaia (Hees *et al.* 2017) pour des théories métriques. Ces estimations font intervenir la contrainte de Nordvedt, améliorant ainsi la précision des estimations de β , mais limitant la portée de ce résultat uniquement aux théories acceptant de lier la violation du principe d'équivalence fort, quantifiée par le paramètre η et la géométrie de l'espace (via les paramètres PPN γ , β).

La violation du principe de l'universalité de la chute libre est aussi un test majeur de la relativité générale dans le Système solaire. Pour cela, les avancées des éphémérides lunaires réalisées ces dernières années (Williams *et al.* 2017, Viswanathan *et al.* 2017) associées aux nouvelles techniques d'acquisition en longueurs d'onde infrarouge de la télémétrie laser (Courde *et al.* 2017) ont permis d'aboutir à de nouvelles limites (Viswanathan *et al.* 2018). Il est à noter que la précision de ce test est très dépendant de notre connaissance de la structure interne de la Lune.

Dans la figure 2 sont indiquées les dernières estimations, dont celle obtenue par construction de la dernière éphéméride lunaire et planétaire INPOP17a. Celle-ci est complémentaire de la mesure effectuée par la mission MICROSCOPE qui teste le principe d'équivalence à l'échelle de deux solides confinés dans le vide et non à une échelle astronomique.

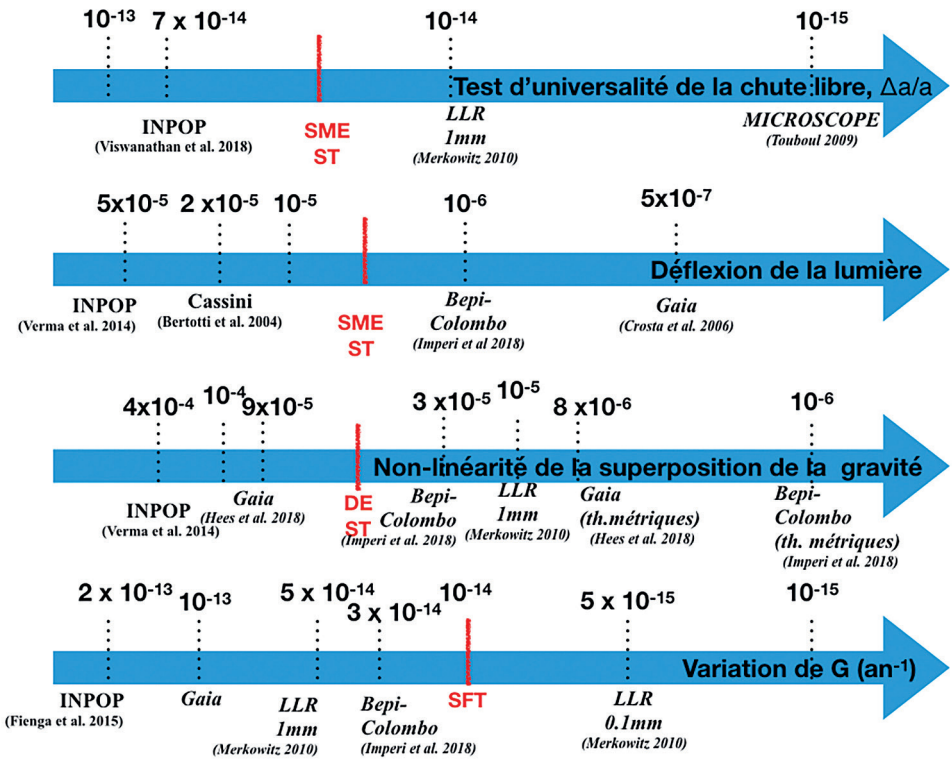


Fig. 2 – Meilleures estimations ou simulations d'estimation (indiquées en italique) pour les termes PPN, le test d'universalité de la chute libre et de variation de la constante de gravitation G.

En rouge sont indiqués des ordres de grandeur contraignants pour les théories indiquées (SME pour Standard Model Extension, ST pour théories des cordes, DE pour énergie noire dans le Système solaire et SFT pour théories tenseurs-scalaires).

La continuation de l'exploration du Système solaire par l'envoi de nouvelles missions martiennes, mais aussi d'exploration du système jovien (JUNO, JUICE), de Mercure (BepiColombo) va permettre d'améliorer encore notre connaissance de la dynamique des planètes de notre Système solaire et ainsi de tester la physique de la gravité.

RÉFÉRENCES

- I. Shapiro, « Fourth Test of General Relativity », *Physical Review Letters*, 13 :789, 1964.
- C.M. Will, « The Confrontation between General Relativity and Experiment », *Living Review in Relativity*, 9:3, 2006.
- A.K. Verma, A. Fienga, J. Laskar, H. Manche, M. Gastineau, « Use of MESSENGER Radioscience Data to Improve Planetary Ephemeris and to Test General Relativity », *Astronomy & Astrophysics*, 561:115, 2014.
- A. Fienga, J. Laskar, P. Exertier, H. Manche, M. Gastineau, « Numerical Estimation of the Sensitivity of INPOP Planetary Ephemerides to General Relativity Parameters », *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2015.
- P. Touboul, « The Microscope Mission and its Uncertainty Analysis », *Space Sci. Rev.* 148, 455, 2009.
- B. Bertotti, L. Iess, P. Tortora, « A Test of General Relativity Using Radio Links with the Cassini Spacecraft », *Nature*, 425, 374B, 2003.
- A. Hees, C. Le Poncin-Lafitte, D. Hestroffer, P. David, « Astrometry and Astrophysics in the Gaia Sky », *Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium*, vol. 330, p. 63-66, 2018.
- L. Imperi, L. Iess, M.J. Mariani, « An Analysis of the Geodesy and Relativity Experiments of BepiColombo », *Icarus*, 301, 9025, 2018
- M. Crosta, « GR Tests and Micro-arcsecond Light Bending Parameters by Global and Differential Gaia Measurements », 2006.
- S.M. Merkowitz, « The Moon as a Test Body for General Relativity », *Living Reviews in Relativity*, 13, 7, 2010.
- V. Viswanathan, A. Fienga, M. Gastineau, J. Laskar, « INPOP17a Planetary Ephemerides », *Notes scientifiques et techniques de l'IMCCE*, 10, 2017.
- V. Viswanathan, A. Fienga, O. Minazzoli, L. Bernus, J. Laskar, M. Gastineau, « The New Lunar Ephemeris INPOP17a and its Application to Fundamental Physics », *MNRAS*, 476, 1877, 2018.

