

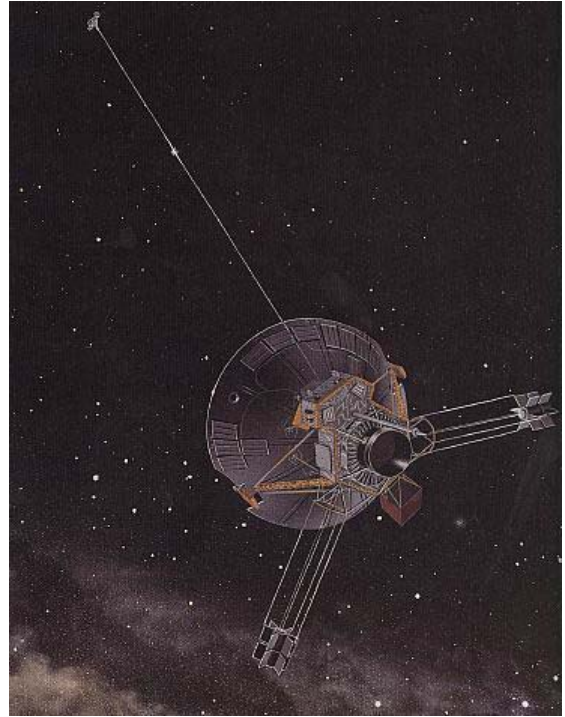
Tests de la gravité dans le système solaire et anomalie Pioneer

Parmi toutes les contributions remarquables d'Einstein à la physique du 20^{ème} siècle, la relativité générale est sans doute celle qui a le plus marqué les esprits. Elle a révolutionné les conceptions de l'espace et du temps qui avaient été développées par Galilée, Newton et leurs successeurs et qui pouvaient sembler définitivement établies à la fin du 19^{ème} siècle. Elle a conduit à plusieurs prédictions qui ont été vérifiées par des expériences de plus en plus précises au cours du 20^{ème} siècle.

Elle continue pourtant de faire l'objet de tests expérimentaux dont l'objectif avoué est de la prendre en défaut. Pour expliquer comment il se fait que les physiciens soient encore intéressés par ces tests, il faut parler de ceux qu'elle a passés avec succès, mais aussi de certaines anomalies théoriques ou observationnelles qui constituent autant de motivations pour les recherches actuelles.

Parmi celles-ci, l'anomalie d'accélération observée sur les sondes Pioneer 10 et 11 dans leur voyage vers les confins du système solaire pourrait constituer le premier indice d'une modification de la gravité à grande échelle. Celle-ci aurait alors des conséquences considérables pour l'astrophysique.

*Serge Reynaud, chercheur CNRS
au Laboratoire Kastler-Brossel, à Paris
(Ecole Normale Supérieure et Université Pierre et Marie Curie).*



Crédit NASA

Introduction

La relativité générale est la théorie relativiste de la gravitation. Einstein en pose les bases dès 1907, dans le premier papier de revue qu'il écrit sur sa toute nouvelle théorie de la relativité. Ces bases sont deux principes qui sont restés les fondements de la relativité générale jusqu'à aujourd'hui : d'une part, le principe de relativité, introduit en 1905 pour l'électrodynamique et le mouvement, doit également englober la gravité ; d'autre part, le principe d'équivalence généralise l'universalité de la chute libre, un élément central de la théorie classique de la gravitation.

Il faudra des années de travail à Einstein pour parvenir à déduire de ces principes les équations de la relativité générale. Ecrites en 1915, ces équations mettent en oeuvre des méthodes géométriques nouvelles pour la physique ainsi que des identifications encore plus nouvelles entre gravitation, mouvement et objets géométriques. La nouvelle théorie remporte immédiatement des succès. L'anomalie de l'avance du périhélie de Mercure est une déviation entre l'observation du mouvement de la planète et les calculs de la physique classique. Ce fait, établi avec soin par les astronomes durant le 19^{ème} siècle, est expliqué par la relativité générale dès sa naissance en 1915, c'est son premier succès. Un deuxième va

suivre dès 1919 : deux expéditions sont montées par Eddington pour observer lors d'une éclipse la déflexion de la lumière par le champ de gravitation du Soleil. Les résultats confirment la prédiction de la relativité générale et c'est un triomphe public : la théorie d'Einstein a supplanté celle de Newton !

Signalons à propos de ces deux premiers exemples une propriété importante des tests de la relativité générale. Celle-ci est une théorie déduite de quelques principes et elle ne contient aucun paramètre supplémentaire autre que ceux qu'elle hérite de la théorie de Newton, la constante G de la gravitation ou la masse M du Soleil. La prédiction théorique est donc une valeur certaine, 43 secondes d'arc par siècle pour l'anomalie de Mercure, 1,75 secondes d'arc pour la déflexion d'un rayon lumineux rasant le Soleil. Tout test précis prend donc le statut d'une expérience cruciale : un désaccord bien établi aurait pour conséquence la remise en cause de la théorie.

En fait, les tests sont moins directs que ne le laisse supposer cette affirmation de principe. On sait aujourd'hui que le test du périhélie de Mercure est ambigu : l'anomalie dépend non seulement de l'effet relativiste calculé par Einstein mais aussi d'un effet classique provoqué par le défaut de sphéricité du Soleil. Comme on ne mesure pas ce deuxième effet avec la précision suffisante, il est difficile de le séparer du premier. Aujourd'hui, ce test n'est toujours pas totalement concluant. Le test de la déflexion de la lumière par les méthodes relativement rudimentaires utilisées en 1919 est lui aussi délicat et n'a pu être confirmé de façon absolument claire que dans les dernières décennies du 20^{ème} siècle. De manière plus générale, les tests de la relativité générale ont connu une traversée du désert après les premiers succès brillants et il a fallu attendre les années 1960 pour en voir une renaissance.

Les tests expérimentaux confirment la relativité générale

Un évènement marquant cette renaissance est la vérification par Pound et Rebka en 1960 de ce que l'on appelle l'effet Einstein. Il s'agit en fait de la première conséquence nouvelle du principe d'équivalence signalée par Einstein en 1907, à savoir le ralentissement de toute horloge placée dans un potentiel gravitationnel ou, de façon équivalente, le déplacement vers le rouge de la fréquence de cette horloge. Einstein avait proposé dès 1907 de tester cet effet en comparant les fréquences d'émission d'atomes à la surface du Soleil à celles connues sur Terre. Ce troisième test de la relativité générale s'est avéré peu concluant parce que les atomes à la surface du Soleil présentent des déplacements de raies importants à cause de leur vitesse, ce qui gêne la mesure de l'effet gravitationnel. Lorsqu'en 1960, Pound et Rebka utilisent des techniques de la physique quantique pour mettre en évidence l'effet Einstein sur des noyaux de l'isotope 57 du Fer, ils réalisent le premier test expérimental de la relativité générale avec un niveau de précision de l'ordre du 1%. Et pourtant le potentiel gravitationnel est celui de la Terre, et la différence de potentiel celle qui existe entre le haut et le bas d'une tour de 22,5 mètres !

Ce succès va être suivi de beaucoup d'autres utilisant les nouvelles techniques expérimentales associées au développement des radars, de l'électronique, des horloges atomiques, de l'optique et des lasers. Cette renaissance accompagne à la fois des progrès spectaculaires en métrologie et un renouveau conceptuel de la théorie. L'apparition des techniques spatiales joue également un rôle décisif, revitalisant le lien ancien entre gravitation et espace en faisant de celui-ci un lieu d'expérimentation et plus seulement d'observation. Un exemple frappant de cette évolution est fourni par les systèmes de

positionnement, GPS puis Galileo, dans lesquels la relativité générale joue un rôle central. Sans prétendre à une quelconque exhaustivité, passons en revue ci-dessous quelques uns des tests réalisés dans les dernières décennies et qui concernent les principes de base de la relativité générale ou certaines de ses conséquences.

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 signification spéciale par rapport au mouvement inertiel, correspondant à une vitesse uniforme. La relativité générale respecte ce principe tout en incluant la théorie de Newton dans la limite des vitesses matérielles petites devant la vitesse de la lumière. Les tests du principe de relativité, en quelque sorte des descendants de l'expérience de Michelson qui révéla à la fin du 19^{ème} siècle la crise de la théorie classique, sont encore effectués aujourd'hui. Ils en confirment la validité à un très haut niveau de précision.

Un deuxième principe, le principe d'équivalence, joue un rôle essentiel pour caractériser la relativité générale parmi d'autres théories relativistes possibles. Il est basé sur 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 d'un corps à une force exercée sur lui. C'est grâce à cette identité que deux corps lâchés sans vitesse initiale dans le champ de gravité de la Terre suivent la même trajectoire accélérée, pourvu que le mouvement ne soit pas affecté par des forces autres que la gravité, par exemple la friction de l'air. Cette propriété était déjà importante pour Newton, mais Einstein en fait un principe sur lequel repose la relativité générale. L'universalité de la chute libre en devient une conséquence mettant en évidence le caractère géométrique de la nouvelle théorie. Les corps subissant la seule influence de la gravité suivent des géodésiques, c'est-à-dire les courbes qui généralisent la notion de ligne droite dans un espace-temps Riemannien. Ces géodésiques ne dépendent pas de la nature du corps mais seulement du tenseur métrique qui définit la distance entre les points de l'espace-temps.

Le principe d'équivalence avait déjà fait l'objet de tests avant Einstein. A la suite de Galilée, Newton avait réalisé des expériences soigneuses avec des pendules dont les masses avaient des compositions différentes. D'autres physiciens avaient poursuivi ces expériences jusqu'à Eötvös qui atteignit la précision remarquable à la fin du 19^{ème} siècle d'une partie pour 100 millions (une précision de 10^{-8}) grâce à l'utilisation de balances de torsion. Le test est aujourd'hui un test crucial de la relativité générale et il atteint la précision meilleure qu'une partie pour 1000 milliards (10^{-12}). Les améliorations portent très largement sur la compréhension et le contrôle des fluctuations erratiques des instruments qui limitent la précision ultime des mesures.

On atteint la même précision en observant de façon précise la trajectoire de la Lune autour de la Terre. L'idée du test remonte à Newton : l'espace interplanétaire n'opposant pas de résistance au mouvement, il offre des conditions idéales ; si l'attraction de la Terre et de la Lune vers le Soleil ne respectait pas le principe d'équivalence, ceci pourrait se voir sur leur mouvement. Laplace avait utilisé cette idée à la fin du 18^{ème} siècle pour vérifier le principe à mieux qu'une partie pour 1 million (10^{-6}). En mesurant la distance Terre-Lune par le temps d'aller-retour d'un pulse laser depuis une station terrestre jusqu'à un des réflecteurs déposés sur la Lune par les missions Apollo ou Luna, on atteint une partie pour 1000 milliards (10^{-12}).

L'équivalence entre temps et longueur qui se trouve au coeur de la théorie de la relativité permet de mesurer la distance de la Terre à la Lune à quelques millimètres près ! C'est un outil formidable d'observation du système solaire qui a permis d'en mesurer les dimensions d'une façon beaucoup plus précise que par les observations astronomiques antérieures. En faisant de la télémétrie sur les premières sondes artificielles posées sur la planète Mars, la distance entre celle-ci et la Terre a pu être mesurée à quelques dizaines de mètres près, alors qu'elle est d'environ 80 millions de kilomètres à son minimum ! Ces techniques ont aussi permis de mettre en évidence un nouvel effet de la relativité générale, le retard subi par un signal électromagnétique se propageant dans un champ de gravitation. L'accord avec la relativité générale est encore excellent même si, une fois n'est pas coutume, Einstein n'avait pas pensé à cet effet pourtant directement apparenté à la déflexion des rayons lumineux.

Pour clore cette liste bien incomplète, signalons que l'application de la relativité générale à l'astrophysique a produit des progrès impressionnants. De nombreux résultats extraordinaires ont été obtenus sur des objets extrêmement denses créant des champs extrêmement forts. Certains de ces résultats permettent des tests de la relativité générale différents de ceux obtenus dans le système solaire où le champ gravitationnel est toujours faible. En particulier, le chronométrage précis des pulses émis par les pulsars binaires a permis de mettre en évidence l'émission d'ondes gravitationnelles par ces objets. C'est le premier test de cette prédiction essentielle de la relativité générale et, encore une fois, il confirme la théorie. L'observation directe de ces ondes ouvrirait une nouvelle fenêtre d'observation aux astrophysiciens. C'est le but des grands interféromètres optiques construits près de Pise par la collaboration franco-italienne VIRGO, aux Etats-Unis par la collaboration LIGO, ainsi que celui du projet international LISA de construction d'un grand interféromètre dans l'espace.

Et pourtant les tests continuent !

Aujourd'hui, les nombreux tests réalisés confirment la validité de la relativité générale et le succès semble total pour les équations écrites par Einstein il y a 90 ans. Il existe pourtant de nombreuses raisons de soumettre la relativité générale à de nouveaux tests. La première de ces raisons peut être comprise par analogie avec l'histoire de sa naissance racontée plus haut. Einstein a modifié la théorie de Newton non pas parce qu'elle était contredite par les observations mais parce qu'elle n'était pas compatible avec son principe de relativité. Aujourd'hui la théorie d'Einstein a un problème d'abord parce qu'elle ne semble pas compatible avec les méthodes de la théorie quantique, du moins sous sa forme actuelle. Les autres interactions fondamentales, celles qui jouent un rôle dominant dans le monde microscopique, sont décrites par des théories de champs quantiques s'inscrivant dans un programme d'unification poursuivi avec obstination par les physiciens. Par contre, la relativité générale reste une théorie classique, ce mot étant utilisé ici par opposition à quantique. Ce défaut ne la gêne pas pour faire des prédictions fiables dans le monde macroscopique dans lequel elle joue un rôle dominant, 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 succès. Sans entrer plus avant dans la description de ces modèles, le point important ici est que ces modèles conduisent tous à des modifications de la théorie qui ont des conséquences observables. Celles-ci peuvent se traduire par

exemple par des violations apparentes du principe d'équivalence ou des modifications de la loi de force en fonction de la distance. Les expériences discutées plus haut, poursuivies avec des précisions encore améliorées ou dans de nouveaux domaines, sont donc un des moyens dont nous disposons pour tester cette nouvelle physique attendue au delà de nos théories actuelles.

L'espace permet de le faire grâce à l'élimination de certaines limites liées aux expériences terrestres. Ce sera en particulier le cas avec les deux expériences proposées par des équipes françaises qui seront discutées dans les prochains paragraphes. Ces expériences mettront-elles en évidence des écarts à la relativité générale ou bien la confirmeront-elles à nouveau avec une précision encore meilleure ? Là encore, il est trop tôt pour répondre. L'anomalie de Mercure aurait pu être considérée, au début du 20^{ème} siècle, comme un nuage inquiétant dans un paysage par ailleurs radieux pour la théorie de Newton. On peut toutefois remarquer que peu de physiciens de l'époque auraient partagé ce qui fût très tôt une intuition d'Einstein.

Le test de l'effet Einstein, qui constitua un événement extraordinaire en 1960, est réalisé de façon très bien contrôlée aujourd'hui en comparant des horloges atomiques entre elles. Les horloges les plus précises sur Terre fonctionnent avec des atomes refroidis par laser. Leurs performances seront encore améliorées dans quelques années quand elles seront emportées dans l'espace où elles bénéficieront d'un environnement favorable de microgravité. Le projet PHARAO atteindra ainsi une stabilité relative d'une partie sur dix millions de milliards (10^{-16}) sur une durée d'une journée. Cette expérience embarquée sur la Station Spatiale permettra de gagner un facteur 30 sur le test de l'effet Einstein, un facteur 50 sur le test d'une éventuelle variation de la constante de structure fine.

L'espace ouvre aussi des perspectives d'amélioration considérable de la précision du test de l'universalité de la chute libre. Le projet MICROSCOPE utilisera des micro-accéléromètres ultrasensibles pour détecter une éventuelle violation du principe d'équivalence entre des masses de compositions différentes. L'expérience sera embarquée sur un microsatellite à compensation de traînée, c'est-à-dire obligé par une technique de contrôle actif à suivre aussi exactement que possible une géodésique. Le test du principe d'équivalence sera poussé à une précision d'une partie sur un million de milliards (10^{-15}), soit une amélioration d'un facteur mille par rapport aux meilleures mesures faites aujourd'hui sur la Terre ou depuis la Terre.

Et il existe des anomalies observationnelles qui nous y encouragent !

Il existe aussi des raisons observationnelles, venant d'abord de l'astrophysique, qui nous poussent à améliorer les tests de la relativité générale.

Quand on mesure les vitesses de rotation dans une galaxie telle qu'Andromède, on constate qu'elles sont trop grandes par rapport aux quantités de matière contenues dans la galaxie d'après l'observation de leur rayonnement. Tout se passe comme si une partie importante de la matière semblait échapper à nos observations, c'est ce qu'on appelle le problème de la masse manquante. La solution la plus fréquemment étudiée consiste à considérer qu'il existe effectivement de grandes quantités de matière contribuant à la gravitation mais non détectées par les autres moyens d'observation, c'est ce qu'on appelle la matière noire.

Le même scénario semble se répéter à l'échelle de l'Univers : la dynamique de celui-ci ne peut être expliquée en utilisant les lois de la relativité générale et les contenus en matière, énergie et impulsion, connus par les autres moyens d'observation. La cosmologie actuelle se sort de ce paradoxe en ajoutant une composante supplémentaire au contenu de l'Univers, c'est ce qu'on appelle l'énergie noire. Ces deux composantes, matière noire et énergie noire, sont toutes les deux de nature inconnue et elles constituent selon les observations récentes 96% de l'Univers. Il est difficile de prétendre dans ces conditions que la physique est une science finie qui a atteint tous ses objectifs de compréhension du monde qui nous entoure !

Aujourd'hui ces composantes nouvelles ne sont pas identifiées de manière observationnelle, tandis que les lois de la relativité générale ne sont bien vérifiées que dans le système solaire, et non pas aux échelles beaucoup plus grandes des galaxies et de l'Univers. Dans ces conditions, il faut envisager une interprétation concurrente qui est celle d'une modification des lois de la relativité générale à ces grandes échelles des galaxies et de l'Univers. Un des rares moyens dont on dispose pour distinguer ces explications est de vérifier la variation de la force de Newton aux distances les plus grandes possible. Ces tests consistent à comparer aux calculs les mouvements des objets dans le système solaire, planètes ou sondes artificielles.

La plus belle expérience disponible à ce jour sur cette question a été réalisée par la NASA sur les sondes Pioneer 10 et 11. Et les mesures montrent une anomalie, une déviation par rapport aux prédictions, analogue à celle que produirait une force supplémentaire à la force de Newton, orientée vers le Soleil et ayant une amplitude quasiment constante. Cette anomalie peut-elle être la première indication que les équations d'Einstein devront être modifiées aux grandes échelles ? Ou le signe d'une force de frottement sur une distribution de matière encore inconnue aux frontières du système solaire ? Ou bien plus prosaïquement un artefact de la mesure ? Personne ne connaît aujourd'hui avec certitude la réponse à ces questions, mais elles ont une telle importance potentielle que l'anomalie Pioneer est étudiée par des équipes de plus en plus nombreuses.

Une anomalie gravitationnelle dans le système solaire ?

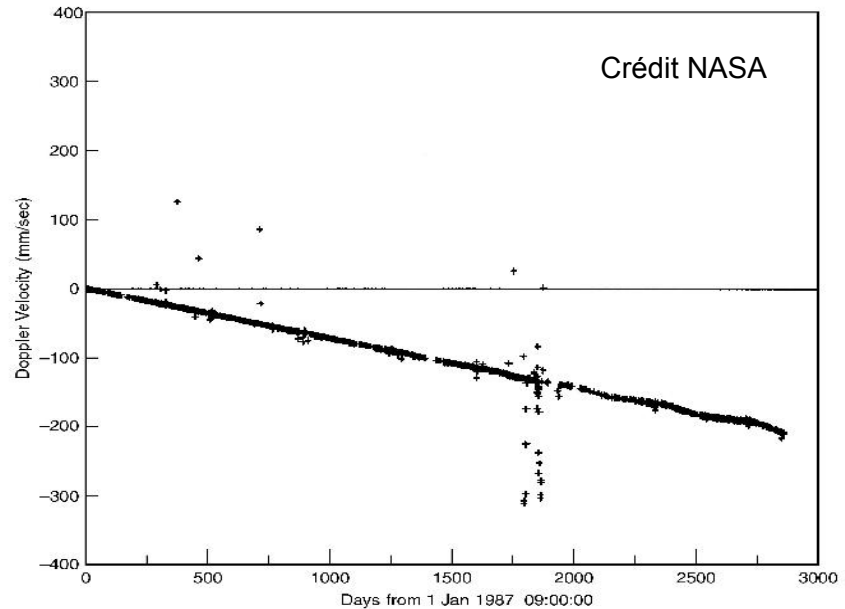
La sonde Pioneer 10 a été lancée en mars 1972 par la NASA de Cap Canaveral en Floride. C'est la première sonde qui ait traversé la ceinture d'astéroïdes puis survolé Jupiter, la géante du Système solaire, en décembre 1973. Elle est aujourd'hui aux confins du système solaire, à plus de 90 unités astronomiques (1 UA est en gros la distance moyenne de la Terre au Soleil, soit 150 millions de kilomètres), avec une vitesse de l'ordre de 12 kilomètres par seconde, soit environ 2,5 UA par an. Elle se dirige vers Aldébaran, dans les parages de laquelle elle devrait arriver d'ici deux millions d'années !

Sa sœur jumelle Pioneer 11 a été lancée en avril 1973, elle a atteint Jupiter en décembre 1974, puis a été la première sonde à survoler Saturne en septembre 1979, en profitant de l'assistance gravitationnelle sur Jupiter. Elle est aujourd'hui à plus de 70 unités astronomiques, avec une vitesse du même ordre que celle de Pioneer 10, mais une direction diamétralement opposée dans le système solaire. Après le survol de Saturne par Pioneer 11, la NASA décide d'étendre la mission avec en particulier un objectif de test des lois de la mécanique céleste dans le système solaire externe.

L'équipe de John Anderson au Jet Propulsion Laboratory (JPL), qui est chargée de cet objectif, décèle alors une anomalie d'accélération, c'est-à-dire une déviation par rapport au

calcul, analogue à celle que produirait une force supplémentaire à la force de Newton. Ce décalage est observé sur les signaux Doppler qui ont permis de mesurer les vitesses relatives des deux sondes par rapport à la Terre réées depuis leur lancement jusqu'à ce que le contact radio soit perdu, en 1990 pour Pioneer 11, en 2002 pour Pioneer 10. La force supplémentaire a approximativement la même valeur absolue pour les deux sondes, et elle est orientée vers le Soleil dans les deux cas.

Ce résultat ne sera publié qu'en 1998, après des années de travaux consacrées par les ingénieurs du JPL à se convaincre de la réalité de l'effet. On voit sur la figure ci-contre les écarts de la vitesse mesurée par rapport à la vitesse calculée dans la théorie standard. Le fait que cet écart augmente comme le temps écoulé montre une anomalie d'accélération à peu



près constante malgré la variation de la distance au Soleil. L'équipe du JPL a également passé en revue toutes les causes pouvant éventuellement expliquer cette force résiduelle : rayonnement de la puissance thermique des générateurs qui fournissent l'énergie aux sondes, fuite de gaz des réservoirs des micro-propulseurs utilisés pour les manœuvres, etc... L'ensemble de ces analyses minutieuses est publié dans un long article en 2002. Il conduit à la conclusion que, si l'existence de l'anomalie est indéniable, celle-ci ne peut être attribuée à aucune des causes auxquelles les auteurs ont pensé.

Après ces publications, la discussion de « l'anomalie Pioneer » va attirer l'attention d'autres physiciens, d'abord peu nombreux tant il était difficile d'envisager qu'une modification des lois de la gravitation puisse se manifester dans le système solaire, alors que tant d'observations sont venues confirmer la relativité générale. Au fil du temps, de nombreuses « solutions », plus ou moins conventionnelles, plus ou moins convaincantes également, ont été proposées et étudiées. On pourra trouver de nombreuses références à ces travaux dans la bibliographie et les sites signalés à la fin de ce document. Une grande difficulté qui doit être traitée avec le plus grand soin est de s'assurer que les solutions envisagées, par exemple sous la forme de frottement sur une distribution de matière encore inconnue aux frontières du système solaire, ou bien une modification des lois de la gravitation, préservent bien la compatibilité avec les autres tests connus.

Récemment des efforts importants ont été consentis par Slava Turyshev du JPL et ses collaborateurs pour récupérer les données des missions Pioneer 10 et 11 qui étaient stockées sous des formats très anciens. Ces efforts ont permis de retrouver toutes les données Doppler pour l'ensemble de la période allant des lancements aux derniers contacts radio. Ces données vont maintenant pouvoir être étudiées par des équipes dans plusieurs

pays pour tenter de répondre à diverses questions ouvertes. On attend en particulier un meilleur contrôle des éventuelles erreurs systématiques et une évaluation plus fine de la direction de la force ou de sa variation temporelle. On peut également espérer corrélérer le signal observé avec divers modèles théoriques pour essayer de déterminer la pertinence des idées qui ont été proposées pour rendre compte de l'anomalie.

D'autres idées sont également discutées activement. On peut rechercher des anomalies reliées à l'effet Pioneer dans d'autres tests effectués dans le système solaire, par exemple les mesures radar sur des sondes planétaires. Ou bien penser à préparer des missions dédiées à la recherche de l'anomalie Pioneer ou des instruments destinés à être embarqués sur d'autres missions mais pouvant apporter des informations intéressantes. Une proposition de mission visant à explorer l'anomalie Pioneer a été soumise à l'ESA en 2005 (<http://fr.arxiv.org/gr-qc/0506139>).

Bibliographie

Les documents liés à la relativité générale n'ont pas manqué à l'occasion de l'année 2005.

On pourra consulter en particulier des articles dans le numéro spécial Pour la Science « [L'ère Einstein](#) » de décembre 2004, le dossier de la Recherche « [Einstein](#) » de février 2005, le [Ciel et Espace](#) Hors Série « Einstein » d'octobre 2004...

Signalons aussi le dossier Pour la Science « [La gravitation](#) » de janvier 2003.

Un livre (traduit de l'anglais) est spécialement consacré aux tests de la relativité générale, « Les enfants d'Einstein », Clifford Will, InterEditions (1988).

Les projets évoqués dans le document sont décrits sur les sites des agences

PHARAO <http://www.cnes.fr/html/112444.php>

MICROSCOPE <http://smc.cnes.fr/MICROSCOPE>

VIRGO <http://www.cascina.virgo.infn.it/>

LIGO <http://www.ligo.caltech.edu/>

LISA <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=LISA&page=index>

En ce qui concerne l'anomalie Pioneer (références en anglais),

Les deux références originales sur l'anomalie Pioneer par J.D. Anderson et ses collaborateurs sont publiées dans Physical Review Letters vol. 83 (1998) pp.2858 et Physical Review vol. D65 (2002) pp.082004 ; les textes de ces articles sont disponibles sur Internet aux adresses <http://fr.arxiv.org/gr-qc/9808081> et <http://fr.arxiv.org/gr-qc/0104064>.

De nombreuses références et informations sont disponibles sur les pages de la « Pioneer Anomaly Investigation Team » @ ISSI <http://www.issi.unibe.ch/teams/Pioneer/>

Des pages sont consacrées à l'anomalie Pioneer sur le site de la « Planetary Society » <http://www.planetary.org>. Des informations plus générales sur les missions Pioneer se trouvent sur les pages de la NASA <http://www.nasa.gov>.

Au moment où ce document est écrit, en juillet 2006, Google <http://www.google.fr> retourne environ 415 000 réponses à la requête « Pioneer Anomaly » !