

# Tests observationnels de la relativité générale

Autor(en): **Bouvier, P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles**

Band (Jahr): **76 (1982-1983)**

Heft 361

PDF erstellt am: **27.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-278141>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## **Tests observationnels de la relativité générale<sup>1</sup>**

PAR

P. BOUVIER<sup>2</sup>

Proposée par Albert Einstein au début de ce siècle, la relativité générale est avant tout une théorie de la gravitation, comme l'était d'ailleurs celle qu'Isaac Newton avait bâtie plus de deux cents ans auparavant sur la loi d'attraction des masses et sur laquelle repose tout le remarquable édifice de la mécanique céleste dont chacun connaît les innombrables succès: analyse rigoureuse des mouvements planétaires, établissement des éphémérides, prévision des éclipses de soleil et de lune avec une haute précision, détermination des masses d'étoiles doubles. Seuls quelques effets de détail tels que le résidu présent dans le mouvement du périhélie de Mercure, restaient inexplicables et c'est précisément là que la relativité générale s'est révélée supérieure à la théorie newtonienne qui reste toujours, pour la grande majorité des problèmes de dynamique planétaire et stellaire, une excellente approximation. Vu la petitesse des effets résiduels évoqués ici, la vérification observationnelle d'une théorie aussi sophistiquée que la relativité générale est une tâche délicate et comme l'interaction que nous baptisons gravitation se fait sentir essentiellement sur des objets de grande masse, c'est-à-dire des corps célestes, les tests qu'il sera possible d'établir seront avant tout de nature astronomique.

Passons donc en revue les quatre premiers tests ou preuves observationnelles à l'appui de la relativité générale.

### *1. Décalage spectral d'une radiation émise dans un champ de gravitation intense*

Considérons un atome A dans l'atmosphère d'une étoile de rayon R et de masse M (fig. 1), émettant une radiation de longueur d'onde  $\gamma$  vers l'observateur O placé sur Terre.

---

<sup>1</sup>Conférence faite à la SVSN le 3 juin 1980, dans le cadre de son Cours d'information.

<sup>2</sup>Observatoire de Genève.

Localisé dans un gaz en laboratoire sur Terre, cet atome émettrait cette radiation avec la même longueur d'onde, caractéristique de la structure intra-atomique. Or, à la surface de l'étoile règne un champ gravifique, c'est-à-dire une pesanteur, souvent beaucoup plus élevée que la pesanteur

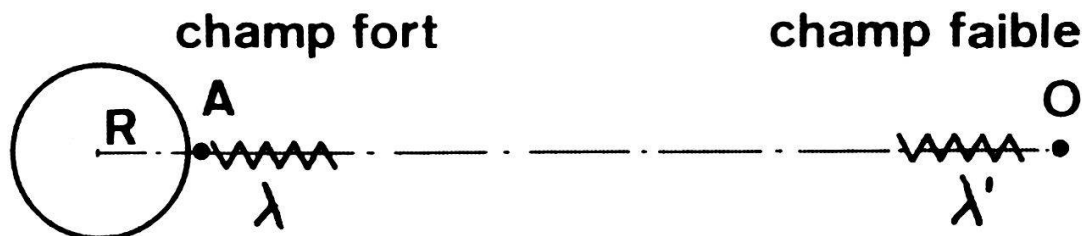


Fig. 1.— Emission par un atome A, à la surface d'une étoile de rayon R, d'une radiation de longueur d'onde  $\lambda$  observée comme longueur d'onde  $\lambda'$  par l'observateur O.

terrestre, tout particulièrement si l'étoile est compacte, possédant donc un rapport  $M/R$  élevé. Il en résulte que le photon, ou paquet d'énergie  $hc/\lambda$  associé à la longueur d'onde  $\lambda$ , doit effectuer un certain travail pour s'extraire du champ de gravitation où il a été émis et atteindre l'observateur O où le champ est comparativement négligeable. Rappelons en passant que, selon l'usage,  $h$  désigne la constante de Planck et  $c$  la vitesse de la lumière dans le vide. Le photon a ainsi perdu de l'énergie quand il arrive sur le récepteur en O, lequel enregistrera donc une longueur d'onde  $\lambda'$  plus grande que  $\lambda$ , comme si la radiation était décalée vers le rouge. Ce décalage spectral  $z$ , défini par le changement relatif de longueur d'onde, se calcule facilement et vaut:

$$z \equiv \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda} = \frac{GM}{R c^2}$$

$G$  étant la constante universelle de gravitation.

Un tel décalage se présente aussi quand une source lumineuse est animée d'un mouvement de fuite par rapport à l'observateur; c'est ainsi que la valeur de  $z$  d'origine gravifique calculée pour le Soleil par la formule ci-dessus est égale à celle que manifesterait une source lumineuse fuyant à la vitesse d'environ 635 m/sec, alors que pour une naine blanche telle que Sirius B, cette vitesse équivalente dépasse 30 km/sec.

Le décalage spectral d'origine gravifique a été mesuré assez récemment en laboratoire (Pound et Rebka, 1960, Pound et Snyder, 1965) dans une tour de 22,60 m de haut à Harvard (USA) où était réalisé un vide partiel. La source utilisée était un bloc solide de Cobalt 57 placé en haut de la tour et se transformant radioactivement en Fer 57 qui émet du rayonnement gamma sous forme d'une raie particulièrement fine (effet Moessbauer); ces rayons sont absorbés par un bloc similaire situé une vingtaine de mètres plus bas, où la pesanteur terrestre est par conséquent légèrement supérieure à ce qu'elle était au sommet de la tour. Le décalage spectral a effectivement été mesuré de la sorte, à une précision ne dépassant pas 1% de la valeur prédite théoriquement.

Ce phénomène de décalage vers le rouge a une portée profonde, car il correspond à un ralentissement de l'horloge microscopique que représente l'atome émettant dans un champ de pesanteur différent de celui où se trouve l'observateur: et ce ralentissement traduit à son tour le mouvement que décrirait dans le champ de pesanteur le référentiel local d'inertie associé à l'atome émetteur; il s'agit finalement de la confirmation du principe dit d'équivalence, l'un des principes de base de la théorie de relativité générale.

Dans le même ordre d'expériences, mentionnons celle qui, tout récemment aux Etats-Unis d'Amérique, consistait à placer à bord d'un avion supersonique une horloge atomique au césium, en liaison radio avec une horloge identique maintenue au sol. A la suite d'un vol d'une durée de quinze heures, l'horloge portée par l'avion a révélé, sur celle restée au sol, une avance de 47 nanosecondes, en accord avec la prédiction théorique.

Le fait qu'il y a eu avance et non retard (on parlerait, en termes de spectroscopie, d'un décalage vers le bleu) tient à ce qu'à haute altitude, l'avion se trouvait dans un champ gravifique plus faible que celui qui règne au sol. L'avance mesurée résulte en réalité ici d'un double effet: d'une part, l'accélération de l'horloge située dans un champ de gravitation plus faible que celui dans lequel se trouve l'observateur; d'autre part, l'effet de la vitesse de l'avion, selon lequel une horloge en mouvement paraît retarder pour un observateur resté au repos. Ce deuxième effet, déjà noté en relativité restreinte, réduit ici d'environ 10% l'ampleur du premier.

## 2. *Précession du périhélie de Mercure*

Si une planète se trouvait seule en présence du Soleil, elle décrirait, d'après la première loi de Képler, une orbite elliptique dont le Soleil occupe l'un des foyers. La situation est toutefois légèrement plus compliquée, car les autres planètes produisent un effet global de précession, que la mécanique de Newton permet d'estimer. Plus marquée pour Mercure dont l'orbite est la plus excentrique des orbites planétaires, cette précession se traduit par une lente rotation du grand axe de l'ellipse dans le sens direct, donc une avance du périhélie d'environ un degré et demi par siècle (fig. 2).

On avait cependant soupçonné très vite que la précession observée dépassait un peu cette estimation et l'on avait tout d'abord tenté, mais en vain, d'interpréter le résidu, de l'ordre de 43 secondes d'arc par siècle, par l'éventuelle influence d'une planète inframercurielle (Vulcain).

Or, le Soleil est lui-même beaucoup plus massif que tous les autres corps du système solaire; son champ de gravitation a en conséquence une symétrie centrale, ce qui dans le cadre de la théorie de relativité générale permet de réduire à trois le nombre des équations du champ. Expriment alors que la trajectoire est une ligne de plus courte distance dans l'espace légèrement courbé par le champ gravifique du Soleil, on obtient assez

directement l'équation de l'orbite qui, en première approximation, ne diffère de celle que fournit la mécanique newtonienne que par un petit terme additionnel, responsable d'une lente rotation de l'ellipse képlérienne qui contient justement l'excès de précession recherché. Pour Mercure, la valeur ainsi calculée atteint  $43,03''$  par siècle, en très bon accord avec les  $43,11''$  observés en moyenne.<sup>1</sup>

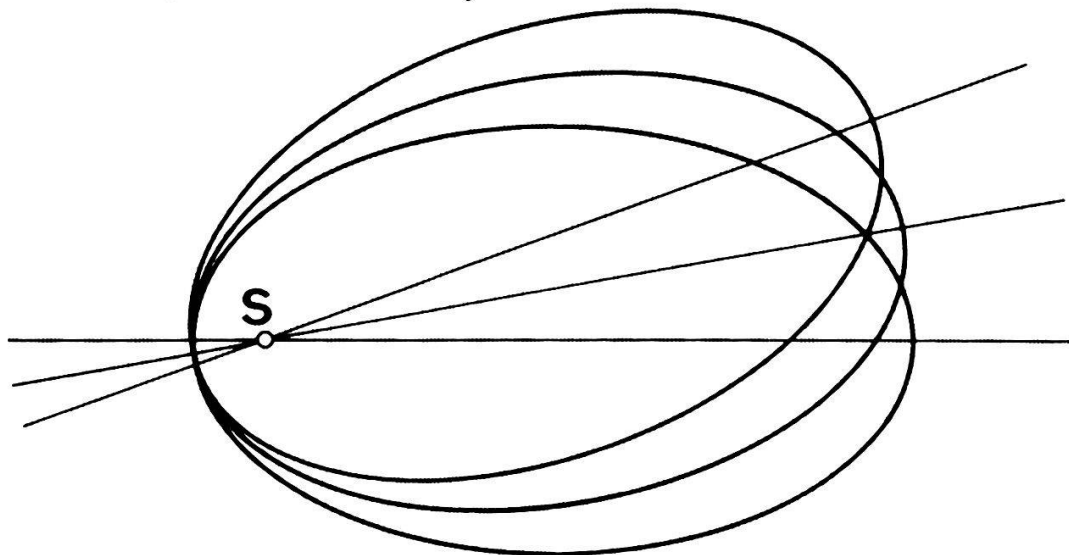


Fig. 2. – Orbite planétaire elliptique perturbée, effectuant une lente précession autour du Soleil S.

Cette avance du périhélie, que les autres planètes possèdent aussi mais dans une mesure nettement moindre, peut s'interpréter en disant que la masse transversale, liée à l'impulsion de la planète selon la relativité restreinte, est plus grande quand elle passe près du Soleil, d'où un surplus d'attraction.

### 3. *Déflexion de la lumière passant près d'une grosse masse*

Lorsqu'une comète passe très près du Soleil à très grande vitesse, elle décrit une orbite hyperbolique et il est aisé de calculer l'angle de déflexion qu'elle a subi. Il en va de même avec un corpuscule matériel quelconque et dans le cas limite d'un photon ou grain de lumière dont la masse est nulle et la vitesse  $c$  égale à  $300\,000$  km/sec, l'angle de déflexion obtenu à l'aide de la théorie newtonienne est de  $0,87''$ .

En invoquant la théorie de relativité générale qui nous fournira l'équation de la trajectoire du photon, nous retrouvons en première approximation le petit terme additionnel déjà intervenu pour la précession des périhélies (N° 2) et dont l'effet est de porter la déflexion au double de la valeur précédente, soit  $1,75''$ .

Des mesures ont été effectuées il y a soixante ans déjà et répétées depuis, lors d'éclipses totales de Soleil (fig. 3) en comparant (non sans

<sup>1</sup> Cet accord reste toutefois sujet à confirmation, vu la possibilité récemment évoquée d'une influence de l'aplatissement du Soleil.

peine) les positions mutuelles d'étoiles voisines du Soleil pendant l'éclipse et les positions de ces mêmes étoiles six mois plus tard; sur environ 400 étoiles, la moyenne des résultats, d'ailleurs fort dispersés, était située vers  $1,89''$ , donnant d'emblée raison à l'interprétation einsteinienne. Plus

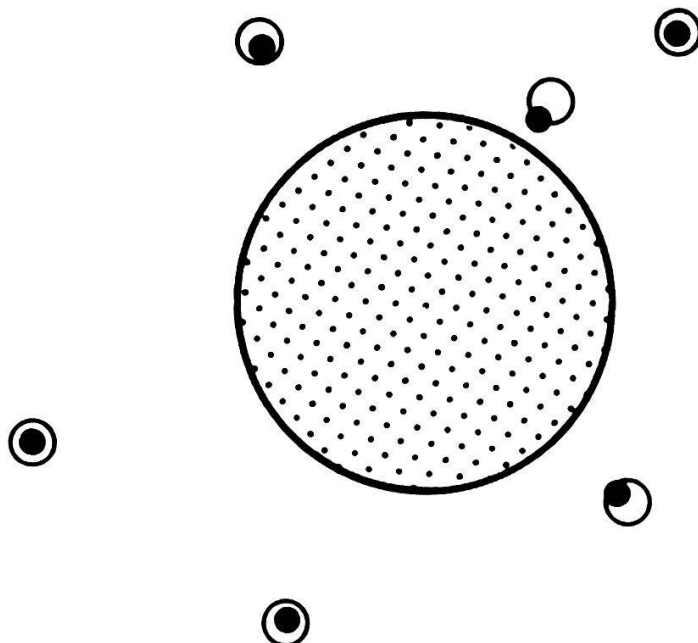


Fig. 3. – Déviation de la lumière d'étoiles très proches du disque solaire éclipse totalement. Les petits disques noirs représentent les étoiles lors de l'éclipse; quand le Soleil aura quitté cette région du ciel, ces mêmes étoiles occuperont les centres des petits cercles. L'effet a été exagéré sur cette figure.

récemment, des mesures faites dans la gamme des ondes radio, provenant notamment de la radiosource 3C 279 occultée chaque année par le Soleil, ont fourni la valeur  $1,73''$ , en excellent accord avec celle que prévoyait la relativité générale.

#### 4. Echos radar

La technique actuelle de radar permet de mesurer avec une haute précision le temps mis par un signal jusqu'à un réflecteur et retour. Ce réflecteur pourra être une planète proche de sa conjonction supérieure ou encore une sonde spatiale localisée presque derrière le Soleil, de sorte que le passage d'un signal radar à proximité du disque solaire mette en évidence un effet relativiste sur le temps d'aller et retour (fig. 4).

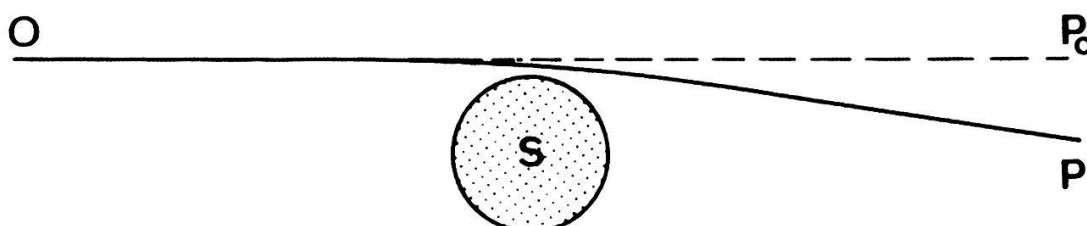


Fig. 4. – Retard d'un écho radar émis par O et reflété par la planète P, après avoir rasé le Soleil, comparé au temps d'aller et retour en l'absence du Soleil, selon le trajet rectiligne qui nous fait voir P en  $P_0$ .

La relativité générale prédit en effet un retard de l'écho du signal émis au point O sur Terre, par rapport au cas d'un signal qui aurait voyagé en ligne droite, sans être influencé par le Soleil comme l'admettait la conception de Newton.

Du point de vue de la relativité, il s'agit de nouveau de suivre la marche du photon dans un champ gravifique à symétrie centrale et dans les conditions du présent problème, le retard de l'écho radar s'élevait, pour un signal reflété par Mercure après avoir rasé le Soleil, à 240 microsecondes, valeur effectivement mesurée récemment par Shapiro et d'autres.

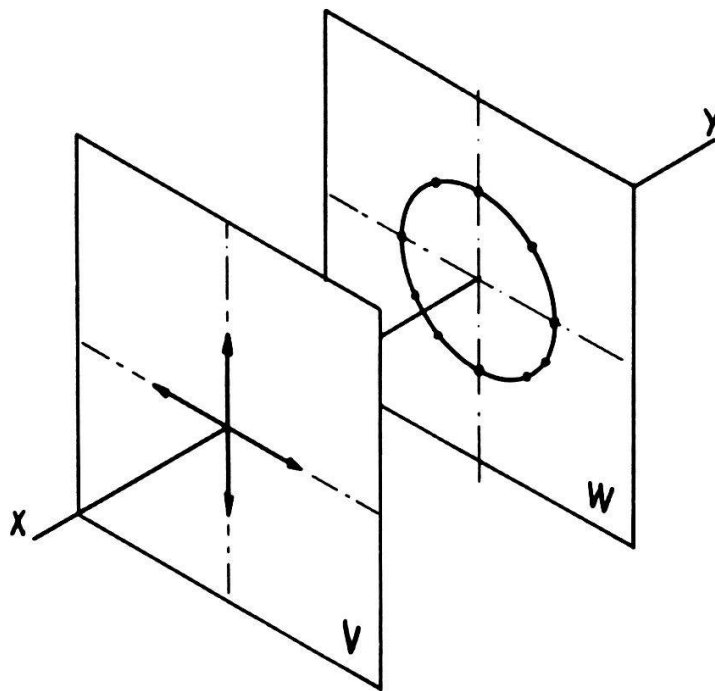
### 5. *Nature des ondes gravitationnelles*

Les quatre tests précédents étaient confinés au système solaire; en outre, ils étaient de nature plutôt statique. Un nouveau test vient d'être obtenu, en faveur de la relativité générale, mettant en jeu les ondes gravitationnelles dont nous allons rappeler ici quelques-unes des propriétés.

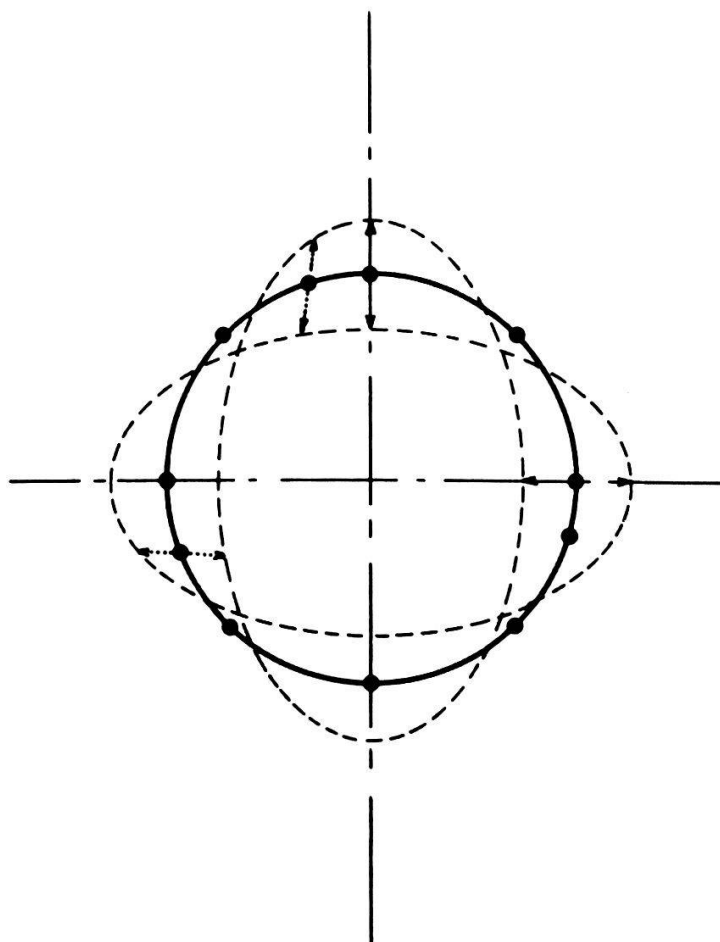
Les interactions électromagnétique et gravifique ont en commun la propriété de posséder un long rayon d'action, correspondant à des forces d'attraction ou de répulsion entre charges électriques, et d'attraction entre masses, décroissant avec l'inverse du carré de la distance. De plus, les équations d'Einstein pour la gravitation, comme celles de Maxwell pour l'électromagnétisme, admettent des solutions de type ondulatoire.

L'émission d'une onde électromagnétique est due à des charges en mouvement accéléré et par réaction, le rayonnement émis entraîne l'amortissement du mouvement des charges, de sorte qu'il faut constamment fournir de l'énergie afin d'entretenir l'émission ondulatoire. L'énergie transportée par une onde émise quelque part peut être partiellement récupérée ailleurs, dans un détecteur qui se chargera de la convertir en d'autres formes d'énergie selon l'appareil enregistreur. Lorsque les dimensions de l'émetteur sont faibles vis-à-vis de la distance au récepteur, nous pouvons calculer le champ tel qu'il arrive au récepteur à l'aide d'un développement en série de termes dits multipolaires, dont il est souvent possible, dans le cas électromagnétique, de ne retenir que le premier, correspondant au rayonnement d'une antenne dipolaire.

Passons maintenant aux ondes de gravitation; envisagées dans l'approximation du champ faible, elles se présentent comme un champ de forces vibratoire se propageant à la vitesse de la lumière et la vibration de ce champ s'effectue dans un plan normal à la direction de propagation, de sorte que les ondes gravitationnelles sont transversales, comme l'étaient d'ailleurs les ondes électromagnétiques. Or, pour une raison indirectement liée au fait qu'il n'existe pas de masses négatives, le terme multipolaire dominant ne sera plus le dipolaire mais le suivant, dit quadrupolaire et en conséquence, les effets produits par les ondes gravitationnelles seront généralement très faibles. Considérons (fig. 5) une onde gravitationnelle plane arrivant sur un groupe de particules distribuées sur un cercle placé



5a



5b

Fig. 5. – 5a. Onde gravitationnelle dont la vibration s'opère dans le plan V et se propage dans la direction XY. Des objets matériels symétriquement disposés sur un cercle dans un plan W parallèle à V vont, une fois atteints par l'onde, subir une double vibration illustrée en 5b.



normalement à l'onde incidente; le passage de l'onde aura pour effet de rompre la symétrie circulaire au profit d'une ellipse s'aplatissant à intervalles réguliers et successivement le long de deux axes perpendiculaires. A ce premier état de polarisation du champ d'onde de gravitation s'en ajoute un deuxième, représenté par une disposition similaire mais où les deux axes ont tourné de  $45^\circ$  par rapport aux précédents. Par superposition de telles ondes planes polarisées, on pourra construire un champ d'ondes polarisé circulairement et toutes ces propriétés, évoquées ici très succinctement, nous informent sur le type de détecteur qu'il convient d'envisager pour des ondes gravitationnelles.

#### 6. Récepteurs d'ondes de gravitation

On peut imaginer tout d'abord que le système récepteur soit représenté par deux engins spatiaux en mouvement libre, dont chacun des occupants vérifie sa distance à l'autre par signaux radar ou laser. Atteints par une onde gravitationnelle, ils devraient observer un changement périodique de leur distance mutuelle, mais nous sommes encore très loin de pouvoir réaliser technologiquement un tel dispositif.

Les antennes réceptrices utilisées jusqu'à maintenant sont constituées par une seule masse, généralement une barre métallique suspendue par des fils d'acier et soumise à un vide partiel (Fig. 6). Lorsqu'une onde de gravitation arrive sur cette antenne, celle-ci subit des contraintes qui l'amè-

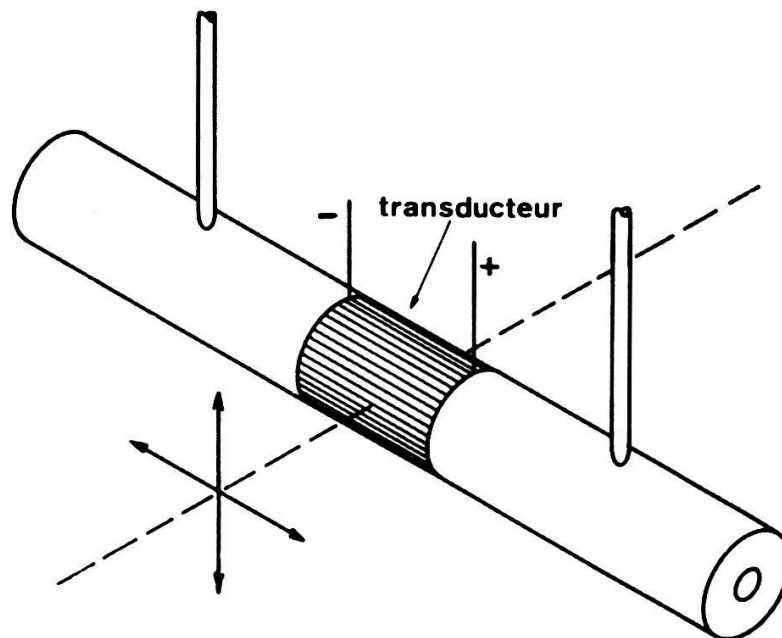


Fig. 6. – Image schématique d'une antenne réceptrice; l'onde gravitationnelle induit dans la barre des vibrations que le transducteur convertit en tensions électriques.

neront à vibrer librement sur plusieurs modes. On étudie plus spécialement les vibrations longitudinales de tubes ou barres cylindriques et l'on retient essentiellement le mode fondamental pour la détection. Les ten-

sions mécaniques (compressions ou extensions) au centre de la barre sont converties en énergie électrique dans un transducteur constitué de céramiques piézo-électriques.

Ce type de récepteur, mis au point par J. Weber aux Etats-Unis dès 1960 et repris ensuite par la plupart des groupes d'expérimentateurs, avait comme premier objectif de détecter les brèves impulsions d'ondes de gravitation que laissaient prévoir les phénomènes d'effondrement gravitationnel conduisant aux événements supernova. Afin d'éliminer les innombrables causes accidentelles de signaux interférents, Weber disposait de deux récepteurs identiques situés à 1000 km l'un de l'autre, permettant ainsi des mesures en coïncidence.

Dès la fin de 1968, J. Weber annonçait avoir observé des signaux qu'il estimait provenir des régions centrales de la Galaxie, mais à une cadence qui impliquait une énergie rayonnée par ondes gravitationnelles de l'ordre de dix mille fois l'énergie de masse du Soleil par an, ce qui apparaît astrophysiquement tout à fait improbable. Et comme aucun des groupes qui s'étaient mis à la recherche des ondes gravitationnelles par coïncidences n'est jamais parvenu à détecter les événements annoncés par Weber à plusieurs reprises, force nous est de conclure que les signaux de Weber n'étaient probablement pas dus à des ondes gravitationnelles, ce qui ne diminue d'ailleurs nullement le mérite de Weber d'avoir été le pionnier de la recherche expérimentale sur les ondes en question.

### 7. *PSR 1913 + 16*

Sans discuter ici les diverses sources d'ondes gravitationnelles qu'il est possible d'imaginer, notons seulement qu'elles sont à rechercher parmi des systèmes formés d'une ou plusieurs masses, manifestant des altérations à la symétrie sphérique variables au cours du temps. On peut songer notamment à des effondrements gravitationnels comme ceux qui caractérisent les supernovae, mais l'émission d'ondes de gravitation, à supposer qu'elle soit notable, sera dans ce cas complètement masquée par le dégagement d'autres énergies, tel que la production de neutrinos. Dans un ordre de phénomènes beaucoup plus simples, les étoiles binaires à forte excentricité orbitale sont des émetteurs d'ondes gravitationnelles, mais de très basse fréquence et trop faible intensité pour être enregistrées sur Terre. La situation deviendrait toutefois plus favorable si l'un au moins des composants de la binaire, sinon les deux, se trouvait être un astre compact.

Or, vers la fin de 1974, les astronomes américains Hulse et Taylor découvraient un pulsar de type inusité, noté 1913 + 16 d'après ses coordonnées dans la constellation de l'Aigle; sa pulsation s'effectuait en 59 millisecondes et, ce qui est beaucoup plus intéressant, des changements périodiques dans le rythme de pulsation indiquaient que ce pulsar formait avec un compagnon inobservable une étoile binaire et l'on ne tardait pas à réaliser que ce compagnon devait être, comme le pulsar lui-même d'ail-

leurs, un astre compact ultradense, probablement une étoile à neutrons ou une naine blanche.

Séparés par une distance de l'ordre du million de kilomètres, ces deux astres compacts de masse sensiblement égale chacune à une masse solaire et demie, tournent l'un autour de l'autre en un peu moins de huit heures, sur une orbite assez excentrique, et l'on voit mal qu'un tel système puisse dissiper de l'énergie autrement que par émission d'ondes gravitationnelles. Malheureusement, le système 1913+16 est à environ 5 kiloparsecs de nous, donc beaucoup trop loin pour que nous puissions espérer en détecter l'éventuel rayonnement gravitationnel; par contre, nous savons calculer la puissance émise par un tel émetteur binaire, laquelle entraîne d'ailleurs une lente contraction du système, c'est-à-dire une diminution de sa période orbitale, au taux d'un dix-millième de seconde par an dans le cas présent.

Or, l'observation régulière du pulsar 1913+16 et de sa période orbitale a révélé, sur six ans, une baisse de celle-ci s'élevant à 6 dix-millièmes de seconde, soit exactement le résultat prévu (fig. 7).

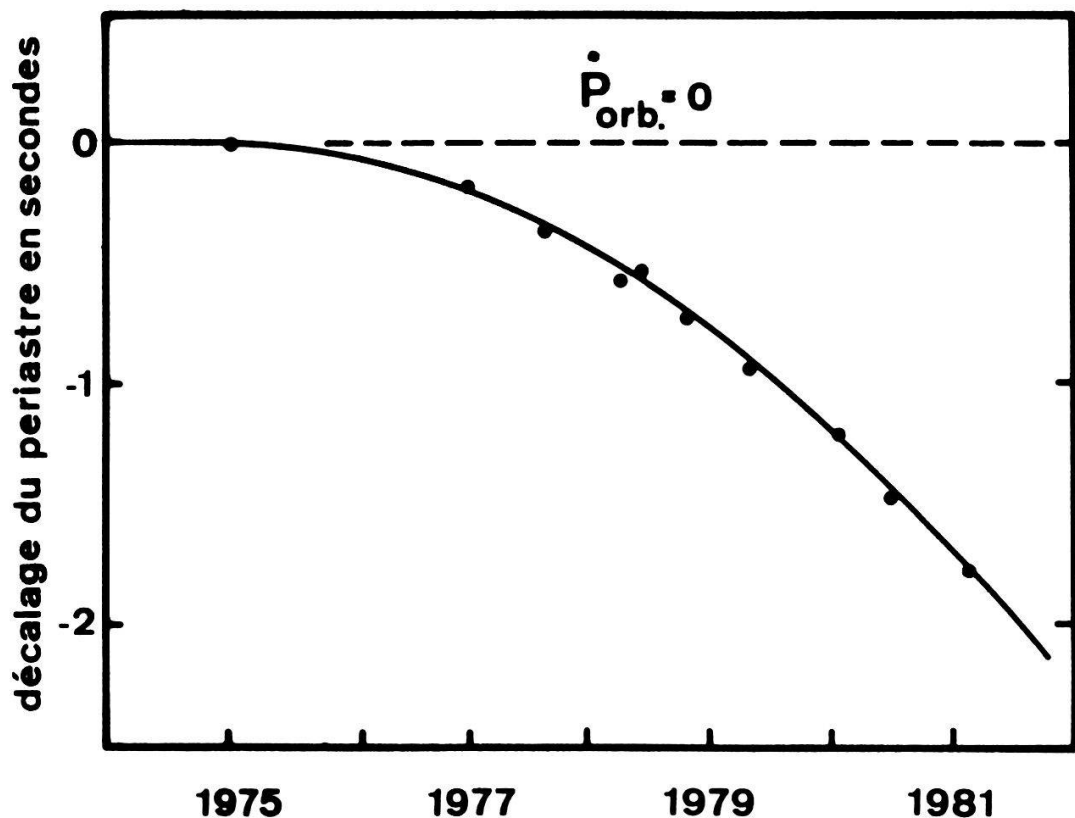


Fig. 7. – Ralentissement, cumulé sur six ans, de la période orbitale du pulsar 1913+16. La droite horizontale traitillée correspond à la valeur inchangée de 1974.9.

Par conséquent, si la réalité des ondes gravitationnelles ne pouvait ici se manifester par leur détection expérimentale directe, nous sommes toutefois en mesure de certifier qu'en supposant l'existence des ondes de gra-

vation nous parvenons à rendre compte du raccourcissement de la période du système 1913 + 16 avec une remarquable exactitude. Inversement, si, encouragés par toutes les vérifications expérimentales effectuées à ce jour, nous admettons la validité de la théorie d'Albert Einstein, alors l'observation du pulsar PSR 1913 + 16 constitue aujourd'hui la mise en évidence la plus convaincante quant à l'existence des ondes de gravitation.

#### 8. *Remarques sur les astres compacts et sur la cosmologie*

Nous voudrions souligner, pour terminer, le rôle prépondérant que joue la théorie de relativité générale dans deux domaines liés à des développements actuels tout à fait fascinants: les astres compacts et la cosmologie.

Lorsque au cours de son évolution interne une étoile épuise peu à peu son carburant nucléaire, l'évolution se précipite et conduit, souvent après des phases violentes d'éjection de matière ou même d'explosion, à un astre compact dont la masse totale restante est confinée par sa propre gravitation dans un très faible rayon. Le champ de gravitation à la surface d'un tel astre est évidemment considérable et l'on peut penser que la théorie de Newton risque d'être mise en défaut, sinon pour les naines blanches, plus vraisemblablement pour les étoiles à neutrons. Le cas extrême de ces astres compacts est celui des trous noirs, encore non observés avec certitude, mais dont le concept se trouvait déjà inclus dans la théorie de relativité générale et seule cette théorie-là a permis d'aborder l'étude de la structure et du comportement de tels astres; la complexité du problème exclut cependant la possibilité de vérifications observationnelles directes.

La cosmologie a pour objet l'étude de l'univers dans sa totalité; elle peut s'appuyer de nos jours sur deux faits d'observation d'une portée fondamentale, à savoir la récession des galaxies (Hubbles, 1929) et le rayonnement thermique de fond du ciel (Penzias et Wilson, 1965). Newton avait toutefois déjà considéré le problème cosmologique en schématisant l'univers cosmique comme un très grand nuage gazeux se dilatant dans le cadre d'un espace absolu, autour de n'importe quel point du nuage pris comme centre. On obtient ainsi des modèles en expansion uniforme ou cycloïdale suivant le signe de l'énergie totale du nuage.

Cependant, la théorie newtonienne ne nous dit rien sur le comportement de la lumière dans l'univers, qu'il s'agisse du décalage spectral des galaxies ou du rayonnement de fond. La théorie de la relativité générale va beaucoup plus loin; elle considère d'ailleurs la gravitation comme un effet de la courbure d'espace-temps et dans la schématisation précédente, le grand nuage de Newton devient maintenant un fluide cosmique qui remplit tout l'espace, avec une pression et une densité toutes deux sources de gravitation.

Les équations du champ de gravitation proposées par Einstein permettent, notamment dans les conditions d'homogénéité et d'isotropie usuellement postulées, sous le nom de principe cosmologique, l'investigation de

nombreux modèles d'univers, dont ceux qui découlaient de la théorie de Newton, mais dont le caractère ouvert ou fermé est dicté par le signe de la courbure d'espace et non celui de l'énergie totale du nuage. Il est certes fort malaisé de voir auquel des modèles schématiques fournis par la théorie l'univers réel dans lequel nous vivons ressemble le plus. Toutefois, de la gamme des modèles d'univers assez simples dits de Friedmann (1922), nous pouvons extraire un modèle standard servant de cadre à l'histoire thermique de l'univers écoulée au cours des quinze derniers milliards d'années, telle que nous pouvons la décrire aujourd'hui de manière sommaire mais relativement cohérente, en accord avec les deux faits d'observation fondamentaux mentionnés plus haut et impliquant, par voie de conséquence, la formation des éléments chimiques, des étoiles et des galaxies.