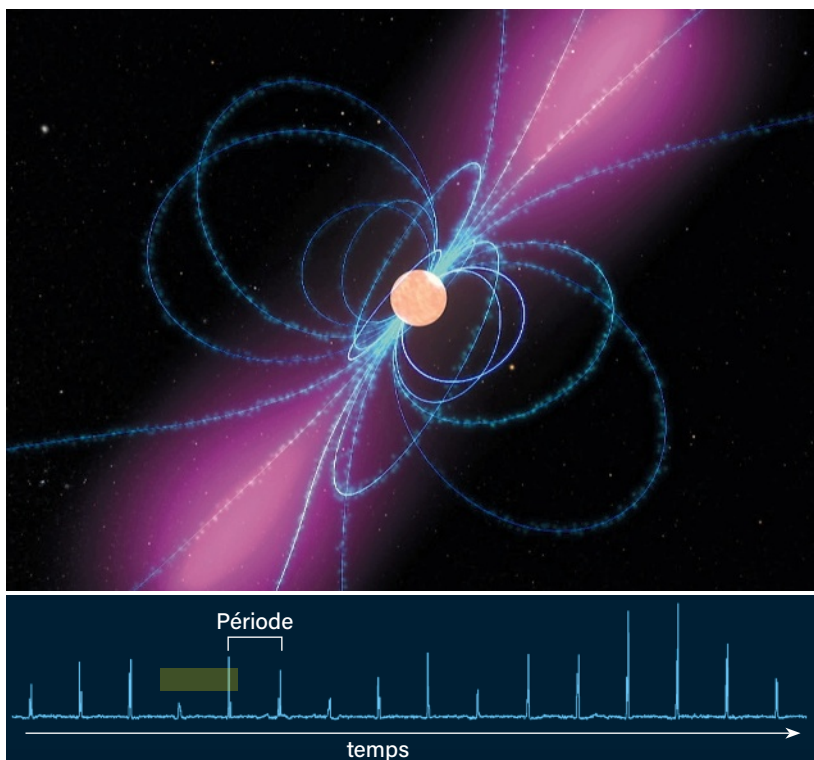


un phare dont les faisceaux balai-ent l'espace avec une grande régularité, d'où le nom de pulsar. Un observateur sur Terre peut alors chronométrer les impulsions radio du pulsar avec une très grande précision.

Si une onde gravitationnelle passe entre nous et un pulsar, elle va induire une avance ou un retard sur les «bips» émis par l'étoile qui nous arrivent, habituellement, de façon très régulière. La mesure de ces fluctuations permet de détecter et caractériser l'onde gravitationnelle. Cependant, comme le signal est soumis à d'importantes perturbations et qu'il n'existe pas une source unique, mais un grand nombre d'émetteurs d'ondes gravitationnelles, l'idée est de suivre quelques dizaines de pulsars pour corrélér leurs signaux et identifier une signature caractéristique à basse fréquence, commune à toutes ces étoiles (quoique modulée d'un pulsar à l'autre en fonction de leurs positions spatiales relatives).

En 1978, Mikhaïl Sazhin, de l'institut astronomique Sternberg, à Moscou, a été le premier à proposer d'utiliser ainsi les pulsars pour détecter des ondes gravitationnelles de basse fréquence. En 1979, Steven Detweiler, de l'université Yale, aux États-Unis, a estimé que la précision chronométrique obtenue sur la mesure de la période de rotation d'un pulsar permettait d'atteindre une limite de  $10^{-11}$  sur l'amplitude de l'onde gravitationnelle (il s'agit d'une valeur relative, donc d'un nombre sans dimension: le passage de l'onde produirait une variation d'un cent-milliardième de la période apparente du pulsar, ou une variation d'un cent-milliardième de toute mesure d'une longueur étalon sur Terre). Conjugée aux progrès des techniques de chronométrie et des capacités de calcul en temps réel, la découverte (en 1982) des pulsars «millisecondes», plus rapides mais surtout à la rotation cent mille fois plus stable que la moyenne des pulsars normaux, a permis de gagner cinq ordres de grandeur sur cette limite de détection, qui est aujourd'hui voisine de quelque  $10^{-16}$  (voir la figure page 43). Cela revient à détecter une contraction ou une dilatation des longueurs avec une précision de



Un pulsar est une étoile à neutrons en rotation rapide. Il présente un champ magnétique intense qui conduit à la formation d'un rayonnement radio émis suivant un faisceau très étroit au niveau des pôles magnétiques. Comme l'axe de rotation diffère de l'axe magnétique, le faisceau balaie l'espace comme celui d'un phare marin, et un radiotélescope en reçoit des «bips» réguliers. Ainsi, la séquence de 22 secondes en provenance du pulsar PSR B0301+19 (en bas) a une période de 1,38 seconde. On note que chaque pic est un peu différent, ce qui induit des perturbations lors du chronométrage effectué pour traquer des ondes gravitationnelles.

l'ordre de l'épaisseur d'un cheveu sur la distance Terre-Soleil.

Le radiotélescope décimétrique de Nançay (voir la photo page 40), deuxième antenne européenne par sa taille, est équipé d'une instrumentation dédiée qui permet de dater avec précision des impulsions de pulsars à seulement quelques dizaines de nanosecondes près. Depuis 2004, l'équipe française qui opère sur ce radiotélescope observe plusieurs dizaines de pulsars très stables. Ces observations contribuent à près de 60% aux données du projet européen de réseau de chronométrie de pulsars (EPTA, pour *European pulsar timing array*) et donnent lieu à une participation active dans la collaboration mondiale de l'*International pulsar timing array* (IPTA), qui regroupe aussi une équipe américaine et une autre australienne.

La mesure est évidemment très difficile à réaliser et requiert une modélisation complète du système Terre-pulsar dans toute sa complexité. La première étape concerne le pulsar, une horloge pas aussi parfaite que nous le laissons penser. L'ensemble des particules accélérées dans la magnétosphère de l'étoile à neutrons produit une émission relativement stable, mais qui change malgré tout un peu d'un «bip» à l'autre (voir la figure ci-dessus). Il en résulte un «bruit» qui varie de quelques nanosecondes à quelques dizaines de nanosecondes selon le pulsar.

À cela s'ajoute un second phénomène perturbateur. Le pulsar perd de l'énergie par rayonnement et ralentit par conséquent au cours du temps. Ce ralentissement de la

# Nous datons un signal de pulsar avec une incertitude de quelques nanosecondes

rotation est mesuré très précisément pour chaque pulsar. Il faut aussi considérer d'autres variations très faibles dues à des raisons intrinsèques (réarrangements de la structure interne de l'astre) ou externes (présence d'une ceinture d'astéroïdes ou de débris qui perturbent gravitationnellement l'étoile).

En outre, le pulsar se trouve souvent dans un système binaire, associé à une étoile compagne qui est en général un autre objet compact, une naine blanche ou une autre étoile à neutrons. Le mouvement orbital du pulsar autour du centre de masse du système module le signal émis, celui-ci arrivant alternativement en retard ou en avance du fait de l'éloignement ou du rapprochement de la source. La distance séparant les deux astres étant parfois très faible (avec une période orbitale de seulement quelques heures), la description de la paire nécessite l'évaluation de nombreux paramètres au moyen de la relativité générale, la théorie newtonienne de la gravitation étant insuffisante dans ces situations.

En particulier, le système binaire perd lui-même de l'énergie par émission d'ondes gravitationnelles; les deux corps se rapprochent donc progressivement l'un de l'autre, ce qui accélère leurs vitesses orbitales. L'étude de l'évolution de la période orbitale du système contenant le pulsar PSR B1913 + 16, découvert en 1974 par les radioastronomes Russell Hulse et Joseph Taylor, de l'université de Princeton, a d'ailleurs été l'une des premières preuves indirectes de l'existence des ondes gravitationnelles (résultat obtenu par Joseph Taylor et Joel Weisberg en 1982 qui a valu au premier et à Russell Hulse le prix Nobel de physique en 1993).

## UN LONG VOYAGE

À ces effets relativistes s'ajoutent en outre des corrections liées au trajet de la lumière dans le champ gravitationnel intense du compagne compact: l'effet Shapiro et l'effet Einstein. Le premier correspond à un allongement du parcours du rayon lumineux émis par le pulsar. La trajectoire suivrait une ligne droite en l'absence du compagne, mais comme celui-ci déforme l'espace-temps, le chemin s'en trouve plus long. Quant à l'effet Einstein, il consiste en un décalage vers le rouge d'origine gravitationnelle, qui influe sur la fréquence apparente des pulsations de l'astre.

Une fois ces premiers obstacles franchis, le signal radio entame son long voyage à travers le milieu interstellaire. Il traverse des zones riches en plasma, du gaz ionisé dont les électrons ont un effet dispersif sur l'onde. L'effet est d'autant plus important que la fréquence radio est basse. Il en résulte un retard dit «chromatique», la date d'arrivée du signal sur Terre dépendant alors de la fréquence. À fréquence donnée, le retard est proportionnel au



**Vue partielle du radiotélescope de Nançay, en Sologne. Cet instrument participe aux observations des réseaux de pulsars en vue de la détection d'ondes gravitationnelles.**

nombre d'électrons rencontrés et donc à la distance du pulsar. Cependant, comme le pulsar et le Système solaire se déplacent tous les deux dans la Voie lactée, la ligne de visée change sans arrêt et le contenu électronique rencontré aussi. Cela induit une variation de ce retard chromatique sur des échelles de temps de quelques semaines à quelques années, variation qui est liée à la vitesse de déplacement des deux objets, mais aussi à la taille caractéristique des structures et de la turbulence dans le milieu interstellaire.

Ensuite, le signal parvient dans le Système solaire et rencontre un autre milieu électrique chargé, celui entretenu par le vent solaire. Cela introduit de nouvelles perturbations, liées cette fois-ci à la structure et aux fluctuations de l'héliosphère qui entoure le Soleil. Nous modélisons finement ces effets de dispersion, en incluant par exemple le mouvement de la Terre au sein de l'héliosphère. Les paramètres de ce modèle varient pour chaque pulsar, puisqu'ils dépendent de la position du pulsar dans la Voie lactée et de sa position relative au Soleil vue depuis la Terre.

Quand le rayonnement du pulsar arrive enfin sur Terre, il est de nouveau perturbé par l'ionosphère, la couche supérieure ionisée de l'atmosphère qui nous entoure; mais généralement, cet effet reste très faible aux fréquences radio – de l'ordre de 1 à 2 gigahertz – auxquelles on effectue la chronométrie. On néglige donc cet effet la plupart du temps.

Pour calculer le temps de trajet, il faut considérer le mouvement de la Terre autour du barycentre du Système solaire. Or ce dernier dépend sensiblement de la position relative des différentes planètes. À ce stade, il faut aussi tenir compte de l'effet Shapiro et de l'effet Einstein dus au champ gravitationnel du Soleil. Pour corriger ces effets, on fait appel à un modèle d'éphémérides planétaires construit