

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 compagnon 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 compagnon 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 compagnon, 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 électriquement 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

par des spécialistes de mécanique céleste, modèle qui comporte lui-même des incertitudes. Il faut ensuite considérer la position instantanée du radiotélescope par rapport au centre de la Terre, des éventuels délais induits par le trajet optique dans le télescope, des éventuelles imperfections du récepteur, puis des délais induits par le passage du signal électrique dans les câbles.

On compare alors la forme temporelle de l'impulsion reçue à un modèle moyen de l'impulsion que l'on connaît *a priori* et on relie cette mesure à une horloge de référence. Dans le cas du radiotélescope de Nançay, il s'agit d'une horloge atomique au rubidium, qui est elle-même asservie, *via* un satellite GPS, à la référence de temps atomique international produite par l'observatoire de Paris. Avec un tel système, cette référence de temps est perturbée par un double passage à travers l'ionosphère, puisque l'information transite par un satellite pour relier temporellement Paris et Nançay.

Cette longue énumération semble insurmontable. Pourtant, grâce à un effort constant de modélisation des bruits et d'amélioration des instruments, nous avons atteint un niveau de précision suffisant pour exploiter un réseau

de pulsars afin de traquer des ondes gravitationnelles (voir la figure ci-dessous). En prenant en compte tous les effets mentionnés, nous sommes capables de dater un signal avec une incertitude de quelques nanosecondes à quelques dizaines de nanosecondes. Cette variabilité dépend de la saison et du moment de la journée, car l'activité et les perturbations de l'ionosphère sont liées à l'incidence du rayonnement ultraviolet venant du Soleil.

UN SIGNAL DANS LE CHAOS

Au milieu de tout ce chaos de bruits et variations multiples se cache la signature de l'émission gravitationnelle que l'on cherche à mesurer. Celle-ci correspond à des oscillations entre retards et avances dans les signaux des pulsars d'au mieux quelques dizaines de nanosecondes. La détection du signal gravitationnel est possible grâce au fait que la plupart des autres sources de perturbations sont spécifiques à chaque pulsar, ou bien à un radiotélescope particulier, alors que le « bruit » gravitationnel est, lui, commun aux différents pulsars avec une signature attendue bien caractéristique. En corrélant les signaux des pulsars du réseau, il est possible d'exhiber cette



Schéma de principe d'un système de détection à base de réseau de pulsars. Les signaux des pulsars traversent un espace-temps courbé et arrivent sur Terre avec une grande régularité. Lors du passage d'une onde gravitationnelle, l'espace-temps est perturbé et induit une oscillation entre avance et retard pour le temps d'arrivée des signaux de chaque pulsar. Pour mettre en évidence cette perturbation, l'idée consiste à examiner les corrélations entre les signaux des différents pulsars du réseau.