

Chronométrage ultra-précis des pulsars millisecondes à l'observatoire de radioastronomie de Nançay

Ismaël COGNARD

Candidat CR2 - Concours CNRS 1995 n°14/04

Le chronométrage des pulsars millisecondes

La découverte des pulsars millisecondes devrait rester l'un des événements astronomiques majeurs de la décennie 80. La grande stabilité de rotation de ces objets et la grande précision avec laquelle on peut les chronométrer ont conduit à envisager plusieurs applications astronomiques passionnantes présentées ci-dessous et auxquelles nous proposons de contribuer.

Le chronométrage d'un pulsar consiste à mesurer les temps d'arrivée de ses impulsions radio à un radiotélescope, à une fréquence donnée, pendant plusieurs années (voir dizaines d'années). Les pulsars millisecondes sont caractérisés par des périodes de rotation très courtes, de quelques millisecondes. Ils possèdent par conséquent des impulsions radio environ mille fois plus fines que les pulsars ordinaires et c'est cette propriété qui permet de mesurer les temps d'arrivée de leurs impulsions environ mille fois plus précisément. Par exemple, avec le prototype de la classe des pulsars millisecondes, PSR1937+21, la précision de chronométrage atteint $\sim 0.4 \mu\text{s}$ à 1.4 GHz depuis plusieurs années aussi bien à Nançay qu'à Arecibo. Par ailleurs, la grande stabilité rotationnelle des pulsars millisecondes et donc des séries de chronométrage présente un défi technologique aux physiciens des horloges atomiques qui doivent réaliser une échelle de temps ayant des instabilités relatives inférieures à 10^{-15} sur des intervalles de temps de plusieurs années.

On les chronomètre idéalement aux fréquences de 1 à 3 GHz qui constituent un bon compromis entre leur densité de flux (quelques mJy) et les effets de la scintillation du milieu interstellaire qui diminuent tous les deux quand la fréquence augmente. Les deux grandes surfaces décimétriques, Arecibo et Nançay, ont démarré des observations régulières de haute précision sur ces sources faibles en 1984 et 1988, respectivement. Elles continuent aujourd'hui à conduire l'essentiel du programme de chronométrage sur les pulsars millisecondes.

Applications du chronométrage ultra-précis des pulsars millisecondes

Détection du fond stochastique d'ondes gravitationnelles :

Les temps d'arrivée des impulsions radio des pulsars dépendent de la géométrie, liée à la direction du pulsar et à la position de la Terre par rapport au barycentre du système solaire, et sont affectés par la propagation des ondes radio dans le milieu interstellaire et dans les champs de gravitation du pulsar et du système solaire. Ces phénomènes sont bien connus et rentrent dans le modèle classique d'analyse des données de chronométrage. En plus, toute perturbation de l'espace-temps qui existerait entre le pulsar-émetteur et la Terre-récepteur affecterait ces temps d'arrivée. La superposition d'ondes gravitationnelles provenant de nombreuses sources isolées (corps supermassifs en rotation rapide) et/ou les ondes gravitationnelles primordiales pourraient produire un fond stochastique d'ondes gravitationnelles et causer de telles perturbations. Le fond

d'ondes gravitationnelles primordiales constitue l'écho des tout premiers instants de l'Univers juste après le Big Bang à $t < 10^{-43}$ s (temps de Planck). Ce fond gravitationnel est l'analogie du fond radio à 3K d'origine cosmologique mais nous parvient d'une époque beaucoup plus ancienne encore opaque aux ondes électromagnétiques. C'est un enjeu important du chronométrage ultra-précis des pulsars millisecondes que de fournir, pour des périodes de quelques années, une limite supérieure à la densité d'énergie du fond stochastique d'ondes gravitationnelles ou éventuellement de le détecter. La limite la plus contraignante provient du pulsar PSR 1937+21 observé à Arecibo (Kaspi *et al.*, 1994, *Ap.J.*, 428, 713). Elle se situe pratiquement au niveau du fond produit par les cordes cosmiques invoquées pour la formation des galaxies dans le modèle conçu à l'Institut d'Astrophysique de Paris (Bennett & Boucher, 1991, *Phys. Rev. D* 43, 2733). Enfin, signalons, que la détection du fond stochastique d'ondes gravitationnelles aux périodes de quelques années à partir des séries de chronométrage de 10 à 20 années est complémentaire des programmes spatiaux de détection des ondes gravitationnelles (LISA et SAGITTARUS) et des programmes au sol (VIRGO et LIGO) qui sont sensibles à des périodes beaucoup plus courtes, respectivement de quelques heures et inférieures à une seconde.

Etude du milieu interstellaire ionisé :

L'intégrale de la densité électronique du milieu interstellaire ionisé entre le pulsar et la Terre, caractérisée par la mesure de dispersion DM (Dispersion Measure), retarde de façon chromatique les temps d'arrivée des impulsions mesurés par chronométrage. Par mesure de ce retard chromatique, des observations quasi-simultanées à deux fréquences doivent être conduites pour suivre les variations de DM (Backer *et al.*, 1993, *Ap.J.* 404, 636). La détermination de ces variations est utile en premier lieu pour corriger la série de chronométrage elle-même. Des mesures de ce type sur un ensemble de pulsars bien répartis permettent de cartographier le contenu électronique de la Galaxie (Taylor & Cordes, 1993, *Ap.J.* 411, 674).

Des phénomènes de scintillation sont observés à cause des perturbations introduites par ces variations de densité électronique, sur le front d'onde émis par le pulsar. Du fait des caractéristiques du milieu traversé, c'est un régime de scintillation forte qui est à l'oeuvre, par opposition aux régimes de scintillation faible observés par exemple en optique dans l'atmosphère terrestre. De plus, ce régime de scintillation forte présente, dans le spectre des variations d'intensité observées, 2 pics à des échelles de temps très différentes. Le pic principal se trouve pour des variations d'intensité sur des échelles de temps de l'ordre de quelques minutes : c'est la *scintillation diffractive*. L'autre pic est observé pour des variations aux échelles de quelques semaines : c'est la *scintillation réfractive*. Ces 2 domaines correspondent à des fluctuations de densité électronique sur des échelles de 10^9 et 10^{13} cm, respectivement. Notons que le comportement de scintillation réfractive n'est pas exclusivement réservé aux pulsars; il a en effet été reconnu, assez tardivement d'ailleurs, comme responsable des variabilités basse fréquence des radio-galaxies (Rickett, Coles & Bourgois, 1984, *A&A* 134, 390).

En général, les travaux théoriques sont effectués avec une répartition des variations de densité électronique dont le spectre suit une loi de puissance avec une prédilection pour la turbulence de Kolmogorov d'un indice spectral égal à 11/3. Un des enjeux des études effectuées sur les pulsars est la détermination de cet indice spectral et la confirmation de la nature turbulente du milieu (Rickett, 1990, *ARAA* 28, 561).

Par ailleurs, les effets de scintillation réfractive, aux échelles de temps de quelques semaines, affectent à la fois l'intensité du pulsar et les données de chronométrage sans que l'on puisse facilement les corriger comme l'effet en DM. A Nançay, nous avons observé la signature

d'un événement de scintillation réfractive dans les données de chronométrage de PSR1937+21 (Cognard *et al.*, 1993, *Nature* 366, 320). Cette observation est probablement de même nature que celle effectuée par Fiedler en 1987 lorsqu'il observa une diminution du flux d'une source extragalactique (Fiedler *et al.*, 1987, *Nature* 326, 675 ; Romani *et al.*, 1987, *Nature* 328, 324). Le chronométrage des pulsars fournit néanmoins une information cruciale sur le temps de trajet, que ne peut fournir le suivi de flux effectué sur les sources extragalactiques.

Etude des théories de la gravitation en champ fort (pulsars binaires) :

Le chronométrage précis des pulsars binaires millisecondes est un outil très puissant pour discriminer les différentes théories de la gravitation existantes. L'avantage par rapport aux tests effectués dans le système solaire réside dans le fait que les champs de gravitation dans les systèmes binaires constitués d'étoiles à neutrons sont 10^7 fois plus forts. Les effets sont notablement amplifiés et la discrimination est beaucoup plus sévère comme l'ont montré Damour et Deruelle (Damour & Deruelle, 1986, *Ann. Inst. H. Poincaré (Physique Théorique)* 44, 263) dans une série de papiers décrivant un formalisme analogue au formalisme PPN (Parametrized Post Newtonian formalism) utilisé dans le système solaire en champ faible, ainsi que plus récemment par Damour et Taylor (Damour & Taylor, 1992, *Phys.Rev. D* 45, 1840).

Actuellement, la plus importante contribution provient certainement du pulsar binaire PSR 1913+16 découvert en 1974 par R.A.Hulse et J.H.Taylor. Ce pulsar, très probablement en orbite autour d'un autre pulsar, est un objet extrêmement compact qui se déplace sur une orbite très serrée (8h) et très excentrique. Les effets relativistes sont alors très importants et une diminution de la période orbitale a été observée avec un taux en accord à 0.5% avec la théorie de la Relativité Générale si il y a émission d'ondes gravitationnelles (Taylor, Folwer & McCulloch, 1979, *Nature* 277, 437). C'est d'ailleurs cette première mise en évidence indirecte des ondes gravitationnelles qui a valu le Prix Nobel de Physique 1993 à R.A.Hulse et J.H.Taylor.

Stabilité de l'échelle de temps atomique :

Les instabilités de l'échelle de temps atomique utilisée pour le chronométrage des pulsars millisecondes empêchent de déterminer la stabilité rotationnelle intrinsèque des pulsars millisecondes sur une durée supérieure à un an. En renversant le problème, c'est à dire en postulant que la stabilité rotationnelle des pulsars millisecondes pour des durées supérieures à une année est plus grande que celle de l'échelle de temps atomique, on peut envisager de piloter cette échelle par les pulsars. Cet objectif s'inscrit sur le très long terme puisque plusieurs pulsars millisecondes chronométrés pendant 10-20 ans sont nécessaires comme l'ont montré les études du Bureau International des Poids et Mesures à Paris (Guinot & Petit, 1991, *A.&A.* 248, 292).

Détection de matière autour de pulsars ou dans le système solaire :

Toute matière inconnue (petites planètes,..) dans le système solaire qui interagit gravitationnellement avec la Terre et modifie sa position par rapport au barycentre du système solaire, ou toute matière inconnue autour du pulsar, induit une signature périodique ou multi-périodique dans les données de chronométrage. Nous rappelons qu'une telle signature a été récemment découverte dans les données de chronométrage de PSR1257+12 et interprétée comme la preuve de l'existence de 2 corps de masse terrestre en orbite autour de ce pulsar (Wolszczan & Frail, 1992, *Nature* 355, 145). Les perturbations mutuelles des éléments orbitaux de ces deux planètes en résonance sont également mesurées. Elles excluent une explication alternative à base de différentes précessions affectant le pulsar lui-même (Wolszczan, 1994, *Science* 264, 538). Le

chronométrage des pulsars est la première technique à avoir permis de détecter des planètes extra-solaires.

Dynamique des amas globulaires :

Les systèmes binaires de faibles masses (LMXB : Low Mass X-ray Binaries) qui sont à l'origine des pulsars millisecondes se forment facilement dans les amas globulaires à cause de la grande probabilité de capture due à la grande densité stellaire. Effectivement, de nombreux pulsars millisecondes ont été découverts dans les amas globulaires et leur chronométrage permet de déterminer, entre autre, la dérivée seconde apparente de leur période qui est proportionnelle à $1/c \, da/dt$ (a : accélération) et leur mouvement propre. L'interprétation de la dérivée seconde de la période permet d'étudier la dynamique des pulsars dans l'amas (Phinney, 1992, *Philos. Trans. Roy. Soc. London A* **341**, 39). Si le mouvement propre du pulsar reflète celui de l'amas, la cinématique d'un ensemble d'amas permettrait de remonter au potentiel gravitationnel de la Galaxie et au problème de la masse cachée.

Evolution des étoiles à neutrons :

Enfin de nombreuses études purement astrophysiques sont possibles grâce aux différentes quantités mesurables par chronométrage. Des questions importantes restent encore en suspens, dont les suivantes (Phinney & Kulkarni, 1994, *ARAA* **32**, 591). La mesure du mouvement propre des pulsars millisecondes galactiques met en évidence leur vitesse spatiale faible ($\sim 100 \text{ km/s}$) comparée à la vitesse des pulsars ordinaires acquise lors du phénomène de supernova qui les a engendrée ($\sim 400 \text{ km/s}$). La mesure de la dérivée de la période de rotation permet sous certaines hypothèses de remonter au champ magnétique à la surface de l'étoile à neutrons et pose le problème de l'existence d'une décroissance "naturelle" de ce champ magnétique. Dans certains systèmes binaires, la mesure des effets relativistes permet de déduire la masse de l'étoile à neutrons et ainsi de contraindre les modèles d'équations d'état de la matière nucléaire utilisés dans la description de l'étoile à neutrons. Enfin, l'étude de l'évolution des systèmes binaires est possible à partir de la mesure de tous les paramètres orbitaux de ces pulsars (transfert de masse, circularisation et relation excentricité-période orbitale).

Le chronométrage ultra-précis des pulsars millisecondes à Nançay

Un système de chronométrage a été construit à Nançay comprenant un dédisperseur (oscillateur à balayage de fréquence) et un dispositif pour transférer le temps universel UTC de l'Observatoire de Paris au Radiotélescope de Nançay (système Besançon/LPTF). Un oscillateur balayé, dont la fréquence est modifiée avec le temps, est en effet à la base de l'instrumentation nécessaire à l'observation des pulsars pour s'affranchir de la dispersion des ondes radios introduite par le milieu interstellaire. Ce système, que nous appelons dédisperseur, fonctionne depuis l'été 1988 et nous avons acquis des données de chronométrage très régulièrement depuis cette époque sur deux pulsars millisecondes (PSR1937+21 et PSR1821-24) à 1.4 GHz depuis cette époque. Depuis janvier 1991, avec une nouvelle version améliorée du dédisperseur, nous les observons quasi-simultanément à 1.28, 1.4, 1.68 et 1.7 GHz pour déterminer les variations des mesures de dispersion (DM) le long de leurs lignes de visée.

À Nançay, nous avons choisi de conduire un programme de chronométrage très dense dans le temps et incluant, en plus de la mesure du temps d'arrivée, la mesure de l'intensité du pulsar. Il se traduit par 10 à 12 jours d'observation par mois sur chaque pulsar de notre programme alors qu'Arecibo ne peut consacrer que 2 jours d'observation par mois. L'intensité du pulsar, pour chaque observation, n'est pas disponible avec les données non-calibrées d'Arecibo. Ainsi, Arecibo a cumulé environ 200 mesures de temps d'arrivée sur PSR1937+21 depuis 1984 alors que nous avons accumulé environ 550 mesures sur ce même pulsar depuis 1988. La régularité et le nombre des observations conduites à Nançay permettent de mettre en évidence des phénomènes rapides comme les événements de scintillation réfractive (ou ESE pour "Extreme Scattering Events") qui sont trop mal échantillonnés par Arecibo pour être reconnus comme tels.

En effet, nous avons récemment découvert la signature d'un événement de scintillation réfractive dans les données de chronométrage de PSR1937+21 à Nançay (Cognard *et al.*, 1993, *Nature* **366**, 320). Nous avons modélisé les observations par un nuage ionisé d'une fraction d'Unité Astronomique traversant la ligne de visée en quelques dizaines de jours. Ce modèle est analogue à celui des Extreme Scattering Events découverts en 1987 lors de l'effondrement de la densité de flux d'une source extragalactique qui dura quelques semaines et fut également provoqué par un phénomène de scintillation réfractive (Fiedler *et al.*, 1987, *Nature* **326**, 675 ; Romani *et al.*, 1987, *Nature* **328**, 324). L'information supplémentaire que procure le chronométrage nous a permis de mieux préciser la géométrie du nuage ionisé s'interposant. De part leur grande densité électronique, ces nuages ne font pas partie de la description turbulente du milieu. Ils forment une nouvelle composante du milieu interstellaire ionisé insoupçonnée il y a encore peu de temps. Le chronométrage des pulsars millisecondes est la meilleure façon de les étudier et notre programme de chronométrage à Nançay est très bien adapté à cela.

Les résidus de chronométrage après ajustement des paramètres du modèle sont caractérisés par un écart-type de 0.4 μ s à 1.4 GHz pour une heure d'observation à Nançay sur le plus intense des pulsars observés (PSR1937+21). Cet écart-type est tout à fait comparable à celui trouvé avec les données d'Arecibo à 1.4 GHz. Comme la surface collectrice de cet observatoire est 10 fois plus grande que celle de Nançay, ce bruit de chronométrage n'est pas d'origine instrumentale mais céleste... Il est très probable que les effets aléatoires de propagation dans le milieu interstellaire dominant pour l'instant ce bruit. Le programme de chronométrage d'Arecibo conduit simultanément à 1.4 et 2.38 GHz montre d'ailleurs que le bruit est environ 2 fois plus

petit à 2.38 GHz qu'à 1.4 GHz, ce qui correspond bien aux effets de propagation dispersive et de scintillation réfractive et diffractive qui diminuent avec la longueur d'onde d'observation.

D'autre part, les données de chronométrage de PSR 1937+21 obtenues à Nançay confirment l'existence d'un bruit basse fréquence dans les temps d'arrivée (Cognard *et al.*, 1995, *A&A*, in press). Ceci traduit un phénomène qui n'est pas pris en compte dans le modèle d'analyse des temps d'arrivée. Il pourrait s'agir d'un bruit de rotation intrinsèque au pulsar (Kaspi *et al.*, 1994, *Ap.J.* 428, 713). Nous avons d'autre part commencé à étudier les corrélations entre les temps d'arrivées et/ou le flux en collaboration avec B.J.Rickett de University of California, San Diego. Pour les deux pulsars observés à Nançay, un suivi systématique des variations de DM est en cours au travers d'observations multi-fréquences. A propos du pulsar PSR1821-24, que nous seuls à observer à ce niveau de précision, nous avons également mis en évidence un bruit basse fréquence dans les temps d'arrivée. Il pourrait s'expliquer par la jeunesse relative de ce pulsar et ses instabilités intrinsèques de rotation. Différentes interprétations ont été proposées (Cognard *et al.*, 1995, *A&A*, submitted). Nous avons discuté de l'effet provoqué par la situation de PSR1821-24 dans l'amas globulaire M28. Signalons aussi que nous avons commencé une étude qui s'étend sur une longue durée (un ou deux cycles solaires) à propos de la couronne solaire. En effet, chaque année le Soleil et le pulsar s'approchent à quelques rayons solaires permettant, par effet dispersif, de sonder le contenu électronique de la couronne.

Enfin, actuellement, je suis en séjour Post-Doctoral à l'Université de Princeton dans le laboratoire du Pr J.H.Taylor pour une durée de un an. En plus d'une implication de nature instrumentale dans le développement de leur nouvelle machine à chronométrer et d'une approche du savoir-faire nécessaire pour mener à bien un survey, je dois mener une analyse conjointe des données obtenues à Arecibo et Nançay sur le pulsar PSR 1937+21. En particulier, les observations étant faites typiquement à 1.4 et 1.7 GHz à Nançay et 1.4 et 2.4 GHz à Arecibo, il est possible d'utiliser ces données multi-fréquence complémentaires pour étudier l'influence du milieu interstellaire ionisé.

Projet de Recherche

Nous proposons d'étendre le programme de chronométrage des pulsars millisecondes de Nançay d'une part à un ensemble de pulsars (~10-20) bien répartis sur le ciel et d'autre part à des fréquences d'observation plus élevées (2-3 GHz) qui deviendront accessibles avec la rénovation du radiotélescope par le "projet" FORT. Cette extension du programme d'observation permettra d'atteindre des objectifs scientifiques en cosmologie et astrophysique que nous décrivons plus bas.

Rappelons d'abord que le dédispenseur actuel de Nançay a été utilisé pour observer deux pulsars millisecondes dont les deux séries de chronométrage sont très denses avec 10 à 12 observations par mois (à comparer aux 2 observations mensuelles par pulsar à Arecibo et à des observations tous les 2 mois à Green Bank). Le choix des deux pulsars (PSR1937+21 et PSR1821-24) s'est fait au regard des performances du dédispenseur et de l'autocorrélateur de la station. Ces deux pulsars offraient bien les caractéristiques nécessaires pour effectuer l'étude nouvelle que nous voulions mener au début du projet en 1988. A savoir, étudier le bruit de chronométrage causé par le milieu interstellaire ionisé à l'échelle de la journée ou de quelques jours. Nous avons été récompensés pour cette stratégie d'observation avec la découverte du premier événement de scintillation réfractive observé sur un pulsar.

Developpements instrumentaux :

L'augmentation significative du nombre de pulsars observés à Nançay passe d'abord, et de façon incontournable, par un effort instrumental important. A Nançay, la dédispersion du signal utilise un concept original, où nous analysons en fréquence la différence entre le signal du ciel et un oscillateur balayé en fréquence. Le balayage se fait conformément à la dispersion introduite par la composante ionisée du milieu interstellaire. Le schéma alternatif, adopté à Arecibo, consiste à décaler temporellement après détection les sorties d'un ensemble de filtres étroits pour les additionner ensuite. J'ai activement participé à l'élaboration du dédispenseur à 4 voies, toujours actuellement en utilisation après avoir remplacé le prototype en 1991. Je compte, à l'avenir, continuer à m'impliquer très fortement dans les développements instrumentaux de ce programme tout en poursuivant les observations régulières et l'analyse des données. Plusieurs projets de développements instrumentaux sont actuellement prévus. D'abord, l'augmentation de la largeur de balayage du dédispenseur se fera au moyen de la technologie nouvelle des synthétiseurs de fréquences numériques (DDS) en remplacement des oscillateurs analogiques (VCO) actuels. L'augmentation de la bande dédispersée (de ~15 MHz à ~100 MHz) est équivalente à une augmentation de la bande de fréquence intégrée. Elle permettra donc de chronométrer de nombreux autres pulsars plus faibles et améliorera le réseau de pulsars nécessaire pour séparer les différents effets qui affectent le chronométrage (échelle de temps, éphéméride, milieu interstellaire ionisé, ondes gravitationnelles,...). Un autre développement instrumental est le projet de survey du centre galactique avec le radiotélescope de Nançay en collaboration avec nos collègues américains R.S. Foster, A. Wolszczan, D.C. Backer au début de 1996. Une machine construite aux USA devra être intégrée au radiotélescope pour conduire ce survey qui sera 10 fois plus sensible que le précédent survey de cette région conduit à Jodrell Bank et même notablement plus aux très courtes périodes ($P < 3$ ms). La découverte d'un pulsar de période plus courte que PSR 1937+21 (1.55ms) permettrait de tester les équations d'état de la matière à l'intérieur des

étoiles à neutrons. Enfin, le "projet" de rénovation du radiotélescope de Nançay nous permettra de chronométrer les pulsars à la fois à plus basse fréquence (1 GHz) et plus haute (2-3 GHz). Ce chronométrage est fondamental pour bien séparer les effets du milieu interstellaire ionisé de l'effet des ondes gravitationnelles. Je participerai à l'intégration du dédisperseur pulsar et du nouvel auto-corrélateur à large bande dans le cadre de FORT. Notons aussi que le projet européen du "Square Km Telescope" pourrait conduire à la mise en chantier d'un futur radiotélescope centimétrique/décimétrique à l'horizon 2000 avec une sensibilité sans précédent de $1 \mu\text{Jy}$ (1000 fois mieux que Nançay). Cet instrument serait le meilleur pour conduire des observations de pulsars millisecondes compte tenu de leur très faible densité de flux. Notre équipe de Nançay est très bien positionnée pour jouer un rôle important dans l'élaboration de ce projet.

Notre programme a plusieurs objectifs scientifiques mais l'application en cosmologie qui consiste à mettre une limite supérieure sur la densité d'énergie du fond stochastique d'ondes gravitationnelles reste la plus passionnante. Pour identifier ce fond, il faut néanmoins que tous les effets déterministes et que toutes les sources de bruit soient bien isolées ou séparées. Pour cela, nous devons nous intéresser :

- 1- aux effets de propagation des ondes radio dans le milieu interstellaire ionisé qui s'interpose entre la Terre et le pulsar ,
- 2- aux effets de nature géométrique et relativiste présents dans les pulsars binaires ,
- 3- aux effets dynamiques résiduels dans le système solaire, se manifestant par des corrections au mouvement orbital de la Terre de référence, fourni par les éphémérides de référence du Jet Propulsion Laboratory ,
- 4- aux effets dynamiques dans les amas globulaires où de nombreux pulsars millisecondes ont été découverts.

Nous reprenons chacun de ces points pour montrer qu'ils offrent la perspective d'études astrophysiques riches que nous entreprendrons.

Etude du milieu ionisé :

Ce thème est capital et nous l'avons déjà abordé dans mon travail de thèse de Doctorat. Il faudra renforcer notre compétence en physique des plasmas afin d'interpréter aussi finement que possible les effets de scintillation réfractive forte (ESE) observés. Signalons que deux autres ESEs ont été identifiés, sur PSR1937+21, en décembre 1992 et avril 1994 dans nos données de Nançay acquises à cette époque à 4 fréquences d'observation quasi-simultanément. Nous envisageons d'approfondir l'étude de ces deux événements. Le logiciel développé pendant ma thèse devra être largement complété pour simuler l'effet d'une superposition d'ESE couvrant les échelles spatiales plausibles pour les nuages réfractants. Cette modélisation devra à terme être capable de simuler le type de bruit observé dans une série de chronométrage aussi dense que celle acquise à Nançay. D'autre part, la densité et la complémentarité des mesures de temps d'arrivée et des densités de flux rendent prometteuses leur étude statistique. Quelques calculs d'auto- et de cross-corrélation entre les résidus de temps d'arrivée et les densités de flux observés ont déjà été effectués, mais cette approche est certainement loin d'avoir donné tous les résultats possibles.

Les pulsars binaires :

La plupart des pulsars millisecondes sont binaires et ceci est très bien expliqué maintenant dans le cadre de leur genèse. Il se trouve néanmoins que les deux pulsars millisecondes que nous

suivons à Nançay sont isolés. Par conséquent, le logiciel d'analyse des données de chronométrage développé à Nançay ne contient pas dans le modèle les effets d'un pulsar appartenant à un système binaire. Le formalisme à paramètres post kepleriens mesurables de Damour & Deruelle permet d'appréhender toutes les théories de la gravitation concurrentes, dont la théorie de la Relativité Générale d'Einstein, et de les discriminer. Nous utiliserons ce formalisme pour introduire les effets d'un système binaire dans le logiciel d'analyse des données de chronométrage et comptons sur les données de Nançay pour contribuer à la discrimination entre ces théories de la gravitation.

Effets dynamiques résiduels dans le système solaire :

Le niveau de précision sur le mouvement orbital de la Terre nécessaire pour ne pas introduire de signature à long terme dans l'analyse des données de chronométrage est d'environ 30 mètres à tout instant. Les très précises éphémérides du JPL (Jet Propulsion Lab - Pasadena, CA) sont utilisées avec succès pour le chronométrage à Arecibo et Nançay. Cependant, ces éphémérides se dégradent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la période pendant laquelle les landers Viking, entre 1976 et 1982, ont fourni des mesures de distances ultra-précises entre la Terre et Mars (précision de ~ 7 mètres) qui les ont contraintes très fortement. Les variations à long terme observées dans les données de chronométrage pourraient avoir comme origine une imperfection des éphémérides du JPL. Cette étude critique n'a encore été menée par aucun groupe et nous devrions être bien placés pour l'entreprendre.

Dynamique des amas globulaires :

De nombreux pulsars millisecondes se trouvent dans les amas globulaires. Les dérivées secondes *apparentes* de leurs périodes sont affectées par la dynamique à l'intérieur de l'amas. Les pulsars millisecondes permettent donc de sonder le potentiel gravitationnel de l'amas lui-même. De plus, leurs mouvements propres peuvent être des indicateurs de la dynamique des amas pour étudier le potentiel gravitationnel de la Galaxie et discuter de la présence possible de masse cachée. Notre série de chronométrage sur PSR1821-24 dans l'amas globulaire M28, qui est unique compte tenu qu'Arecibo ne peut observer cette déclinaison, a déjà permis de contribuer à cette discussion dans ma thèse.

Contexte international

Notre travail d'observation s'inscrira dans le cadre du World Timing Array qui est un projet international de collaboration entre observatoires de radioastronomie pour coordonner l'effort de chronométrage sur un réseau de pulsars millisecondes bien répartis sur le ciel, bien choisis pour leur propriété métrologique et bien couverts en fréquences d'observation (1 à 5 GHz). Signalons enfin, à une échéance plus lointaine, qu'avec l'implication de la communauté de radioastronomie centimétrique en France dans un grand projet international (comme le "square km radiotelescope" étudié par les européens), nous pourrions être le fer de lance d'un nouveau programme ambitieux de chronométrage d'un réseau de pulsars millisecondes.

Nous collaborons avec les groupes de D.C.Backer de Berkeley University, de J.H.Taylor de Princeton University, d'Alex Wolszczan de Penn State University de R.S.Foster au Naval Research Lab et de M.Imae du Communication Research Laboratory (CRL) au Japon. Avec ces groupes, nous avons commencé à échanger nos données, à comparer nos logiciels d'analyse et à harmoniser nos programmes d'observation pour les rendre complémentaires. D'autre part, indépendamment R.S. Foster, A. Wolszczan et D.C. Backer ont manifesté beaucoup d'intérêt à collaborer avec Nançay et entreprendre un survey du ciel pour rechercher de nouveaux pulsars millisecondes dès 1996. Nous offririons du temps d'observation de télescope en contre partie du prêt des systèmes d'acquisition de données qu'ils sont en train de mettre au point à Penn State University.

Conclusion

Notre programme d'observation des pulsars millisecondes à Nançay trouve une place de choix dans le projet international du World Timing Array avec les grands observatoires de radioastronomie comme Arecibo, Parkes et le futur GBT (Green Bank Telescope). Nous avons aussi une position enviable en France puisque les compétences variées nécessaires au chronométrage des pulsars et à l'interprétation des données se trouvent au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM, échelle de temps atomique TAI), au Laboratoire Primaire des Temps et des Fréquences (LPTF, échelles de temps et transfert de temps), à l'Institut d'Astrophysique de Paris (IAP, fond stochastique d'ondes gravitationnelles) et à l'Observatoire de Meudon avec le Département d'Astrophysique Relativiste et de Cosmologie (DARC, cosmologie, relativité et pulsars binaires). De plus, le LPCE (Laboratoire de Physique et de Chimie de l'Environnement) du CNRS d'Orléans développe un nouveau pôle "Atmosphère et Cosmos" en cherchant à collaborer avec la station de radioastronomie de Nançay géographiquement proche. Nous devrions trouver dans cette équipe des compétences précieuses en théorie des plasmas.

Enfin notons que notre programme de chronométrage des pulsars millisecondes est l'un des 3 projets fondateurs pour la rénovation du radiotélescope de Nançay (projet FORT). Un financement Région-Etat se met en place pour faire aboutir ce projet et offrir ainsi un instrument très compétitif à la communauté scientifique. Notre travail s'inscrit résolument dans ce contexte.