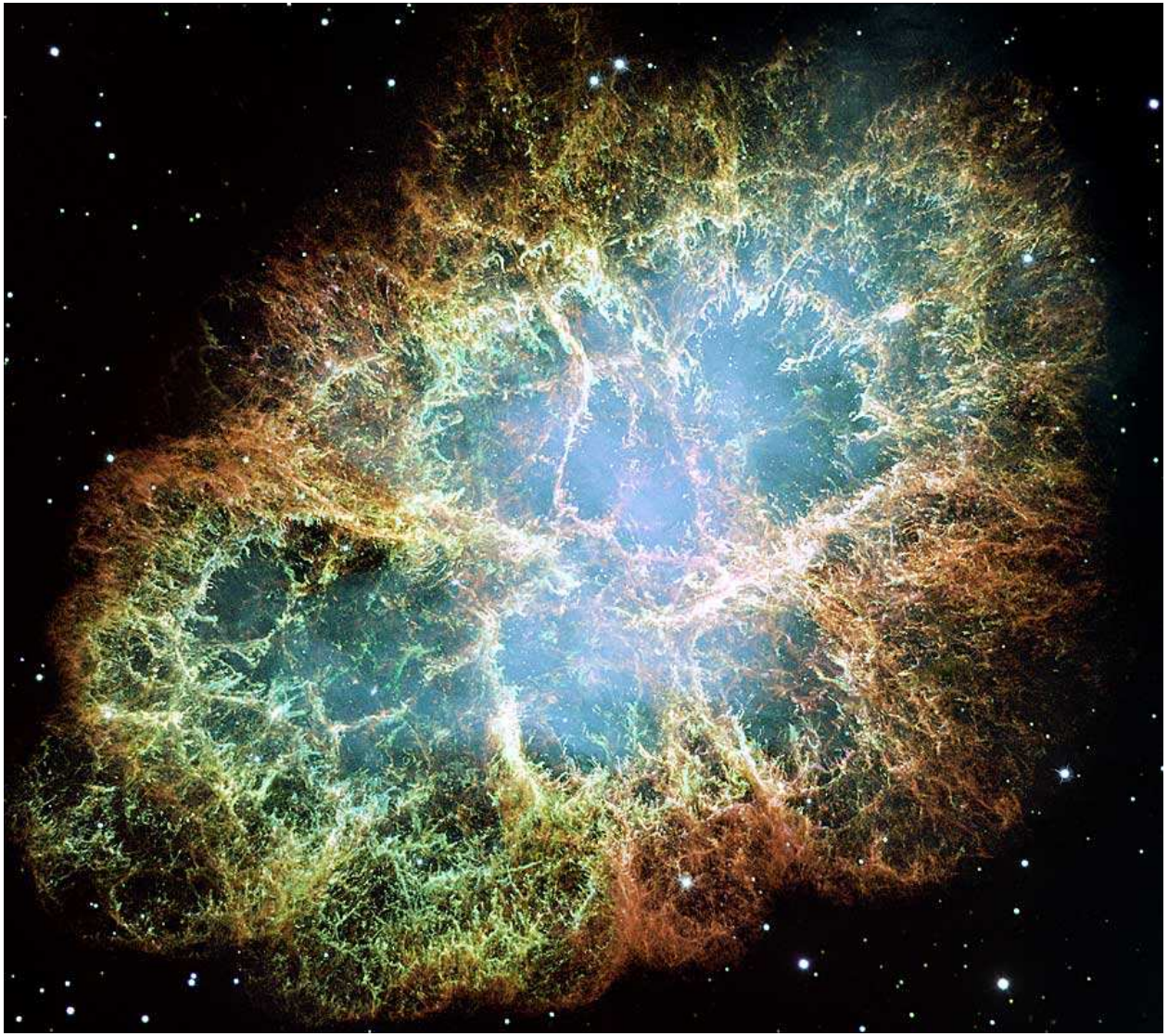
Trouver de nouveaux pulsars radio : 30Go pour une détection à 7 ou 8 sigma

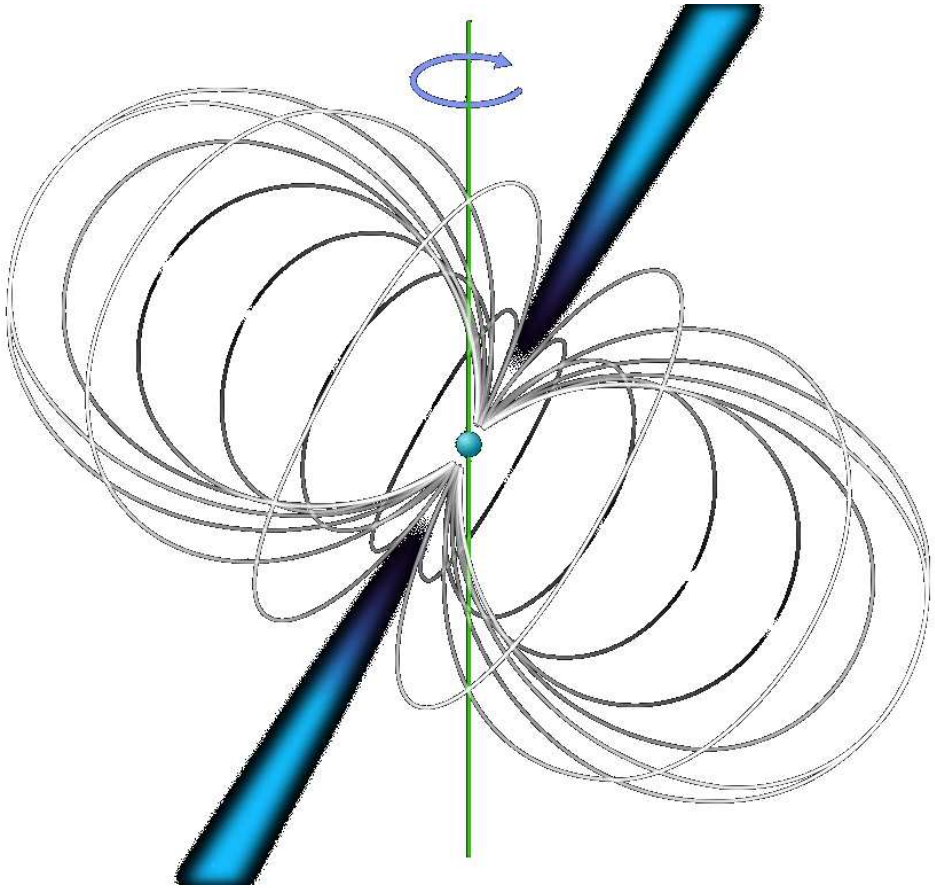
Ismaël Cognard

icognard@cnrs-orleans.fr
G.Theureau, J.-M. Grießmeier, A.Lassus (PhD student), M.Serylak (post-doc)
LPC2E, CNRS - Université d'Orléans

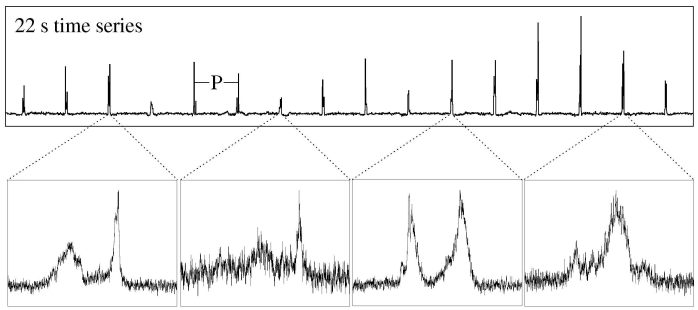
La nébuleuse du Crabe et son pulsar



Le pulsar : le reste de l'explosion d'une grosse étoile



Comme
un phare au bord de la mer,
les faisceaux radio
interceptent
le radiotélescope
à chaque tour,
produisant
des impulsions régulières



140 ms zoom in on individual pulses

Une stabilité exceptionnelle

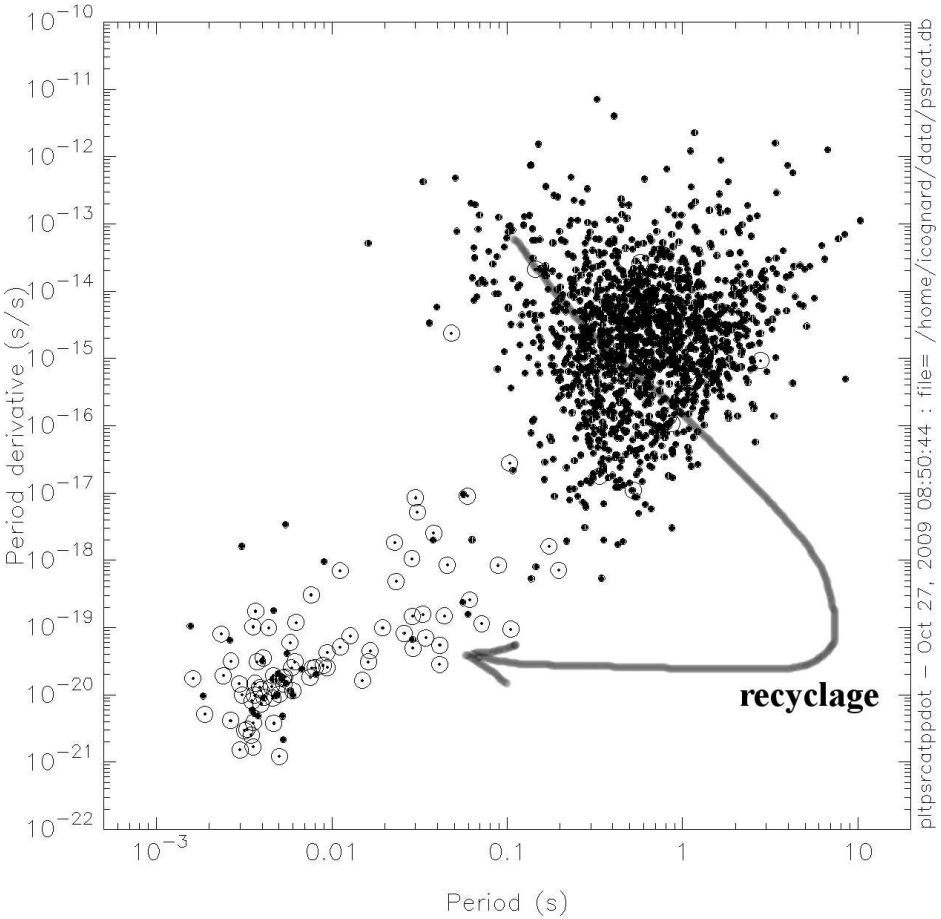


Diagramme Période - Dérivée de la Période

Une première vie très courte...

Après une naissance à ∼30ms,
le pulsar ralentit fortement
et cesse d'émettre en quelques
dizaines de millions d'années.

... puis l'éternité !

Ceux encore présents
dans un système binaire
se font ré-accélérer,
et émettent à nouveau en radio,
ce sont
les pulsars millisecondes recyclés
à la stabilité de rotation exceptionnelle !

Alpar et al., Nature *300*, **728** (1982)

De nombreuses applications

Une stabilité et une précision hors du commun

Alliée à la stabilité de rotation exceptionnelle des pulsars les plus rapides, l'excellence des instrumentations à dédispersion cohérente permet des mesures de temps d'arrivée des impulsions (ToAs) avec une précision pouvant atteindre $\sim$ 30ns.

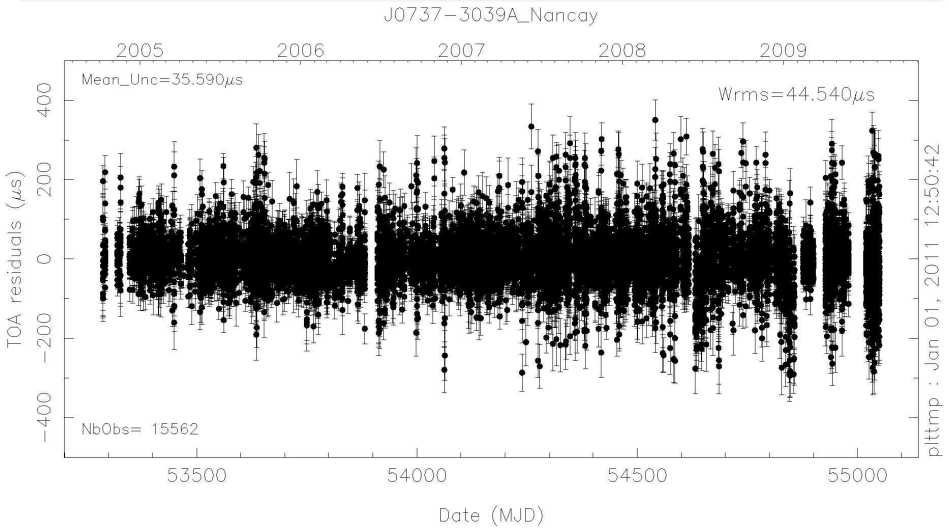
De nombreuses applications

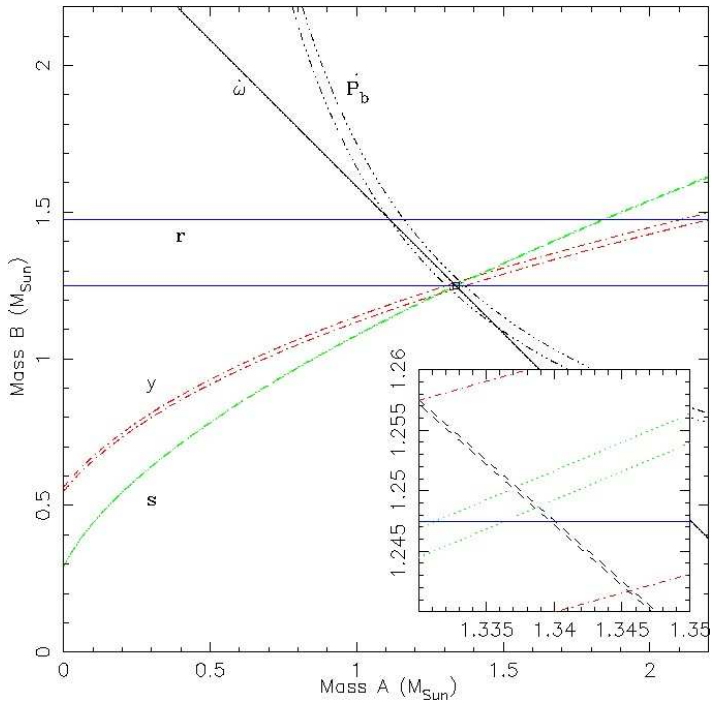
- recherche d'un fond d'ondes gravitationnelles
- tests des différents théories de la Gravitation
- propagation et turbulence du milieu interstellaire
- évolution stellaire
- amas globulaires et potentiel gravitationnel de la Galaxie
- contraintes sur les éphémérides du système solaire
- détection de planètes extra-solaires
- processus d'émission des pulsars
- stabilité à long terme des échelles de temps terrestres
- raccordement des repères célestes (équatorial et écliptique)

Tests de la Relativité Générale

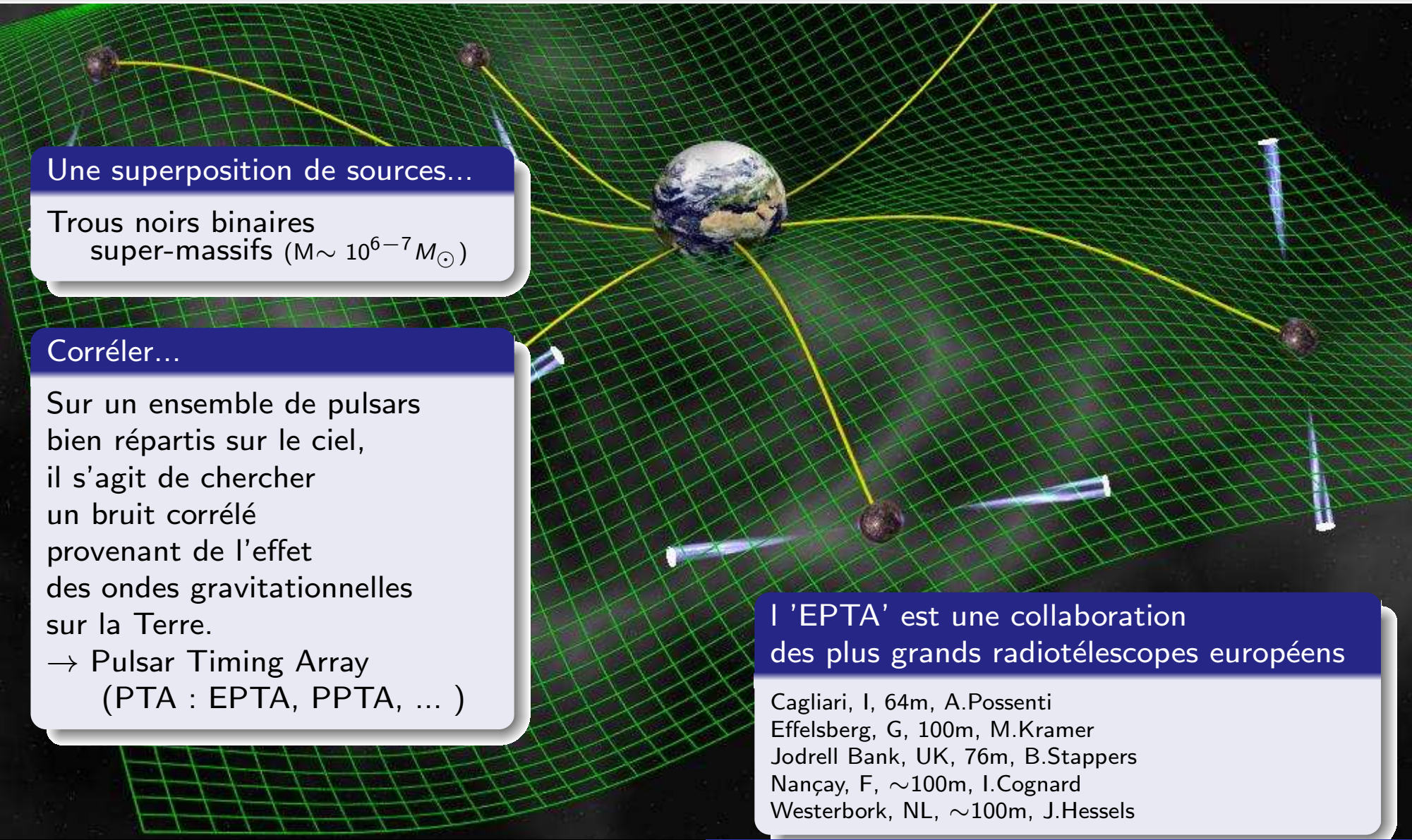
Pulsar double J0737-3039A

Pas moins de 5 paramètres post-Képleriens
'agreement with general relativity
within an uncertainty of 0.05%'
Kramer et al. Science 314, 97 (2006)





Détection d'un fond d'ondes gravitationnelles



Une superposition de sources...

Trous noirs binaires super-massifs (M$\sim 10^{6-7} M_{\odot}$)

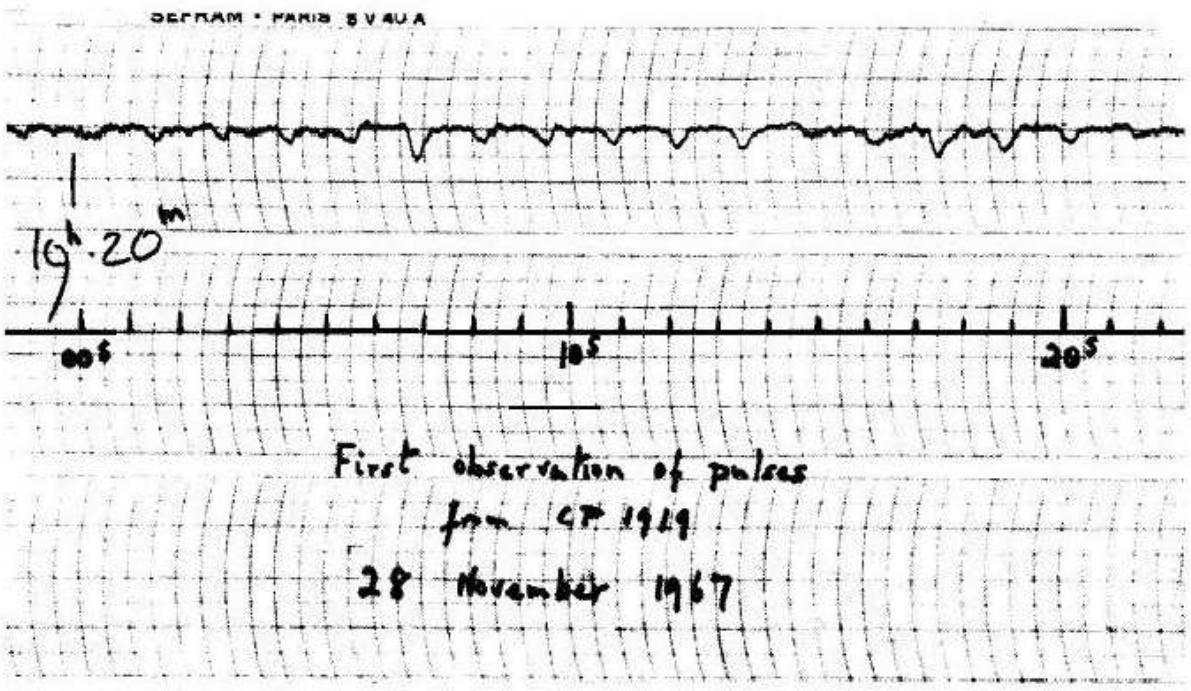
Corréler...

Sur un ensemble de pulsars bien répartis sur le ciel, il s'agit de chercher un bruit corrélé provenant de l'effet des ondes gravitationnelles sur la Terre.
$\rightarrow$ Pulsar Timing Array (PTA : EPTA, PPTA, ...)

l 'EPTA' est une collaboration des plus grands radiotélescopes européens

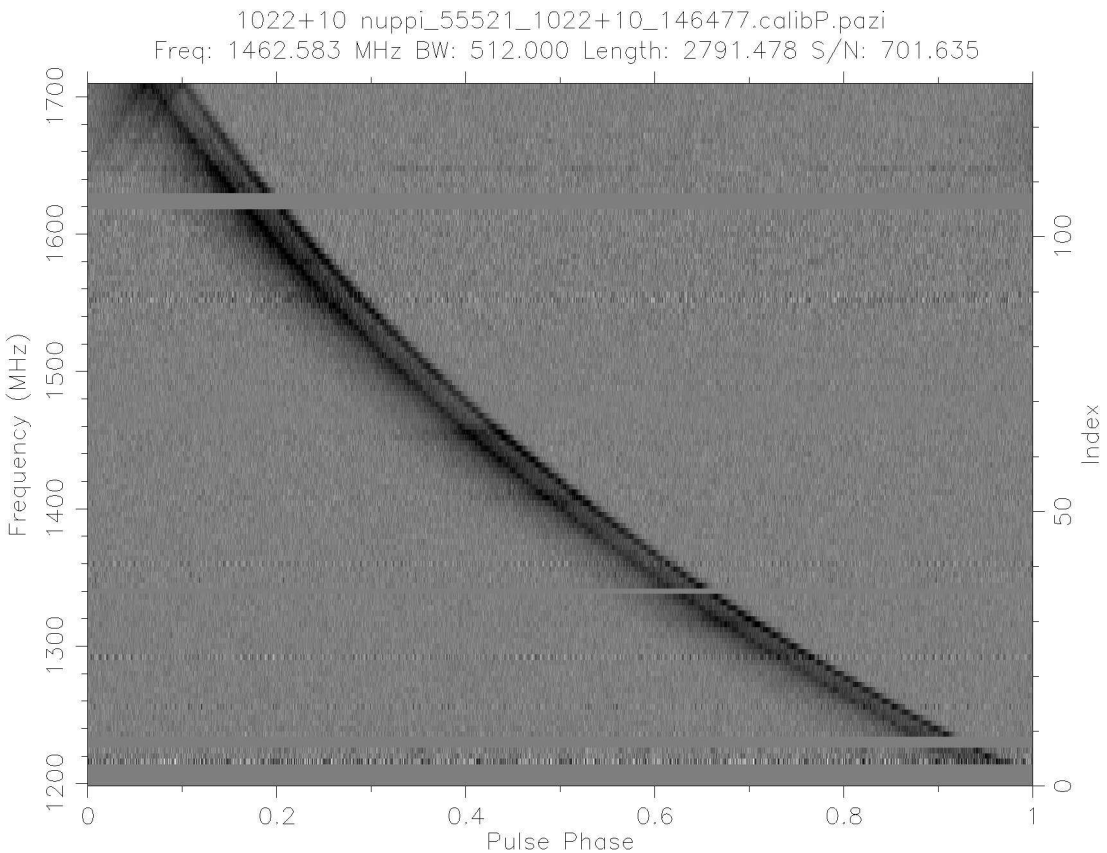
Cagliari, I, 64m, A.Possenti
Effelsberg, G, 100m, M.Kramer
Jodrell Bank, UK, 76m, B.Stappers
Nançay, F, $\sim$100m, I.Cognard
Westerbork, NL, $\sim$100m, J.Hessels

1967, les tous débuts...



Détection du premier pulsar en novembre 1967 à Cambridge
un amplificateur, un stylo sur un dérouleur de papier...
et de la patience pour inspecter des km de courbes !

Un problème... le milieu interstellaire est dispersif



Pulsar 1012+53 : P=5.25ms DM=9.0233 pc.cm^{-3}
128x4MHz - ∼532000 impulsions empilées (46mins)

un plasma froid et ionisé

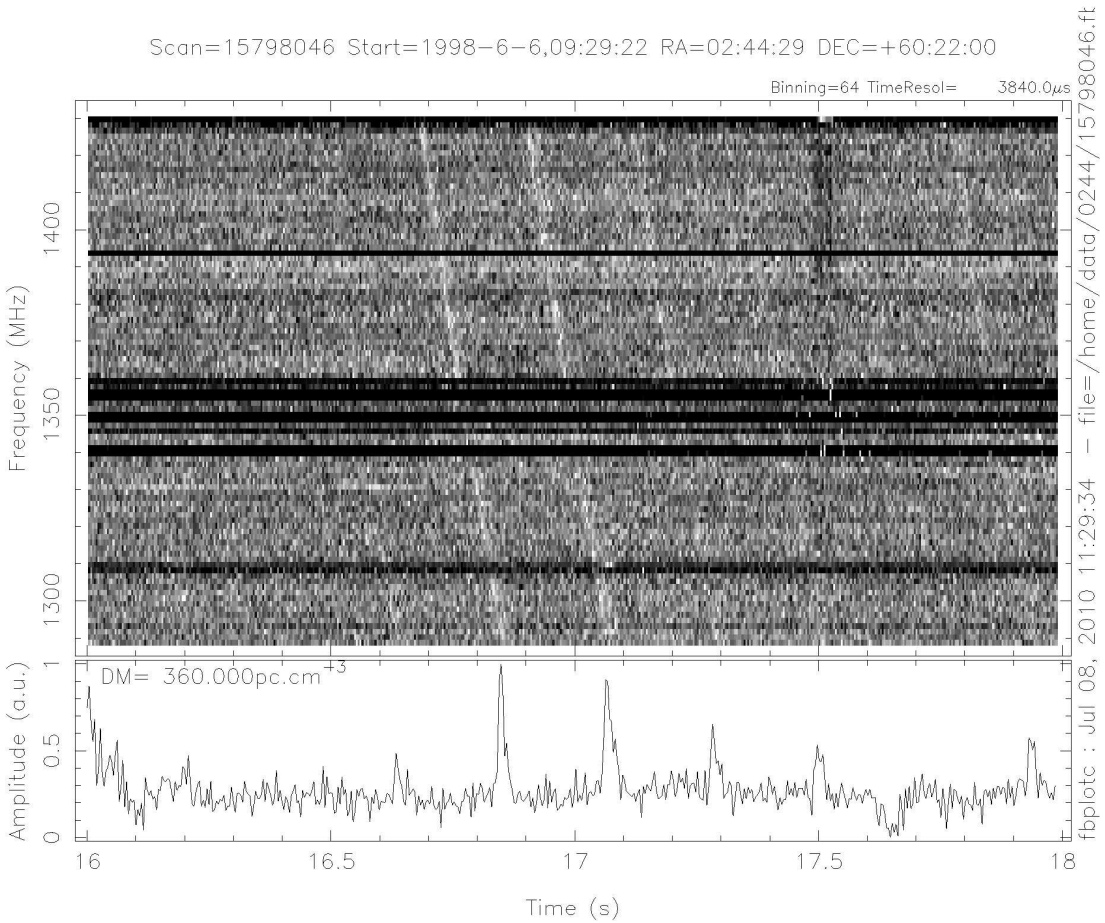
délai temporel par rapport à la fréquence infinie

$$t = k\frac{DM}{f^2}$$

avec $k = \frac{e^2}{2\pi m_e c}$
et DM la 'dispersion measure'
contenu électronique intégré le long de la ligne de visée

$$DM = \int n_e dl \sim n_e D$$

Chercher des impulsions périodiques et dispersées



dans une matrice d'intensité radio (codée sur 1 à 4bits)
d'une centaine de canaux de fréquence ($\sim$1MHzc chaque)
et d'une centaine de millions d'échantillons temporels ($\sim$30μs chaque)

Un programme de recherche de nouveaux pulsars à l'aveugle ?

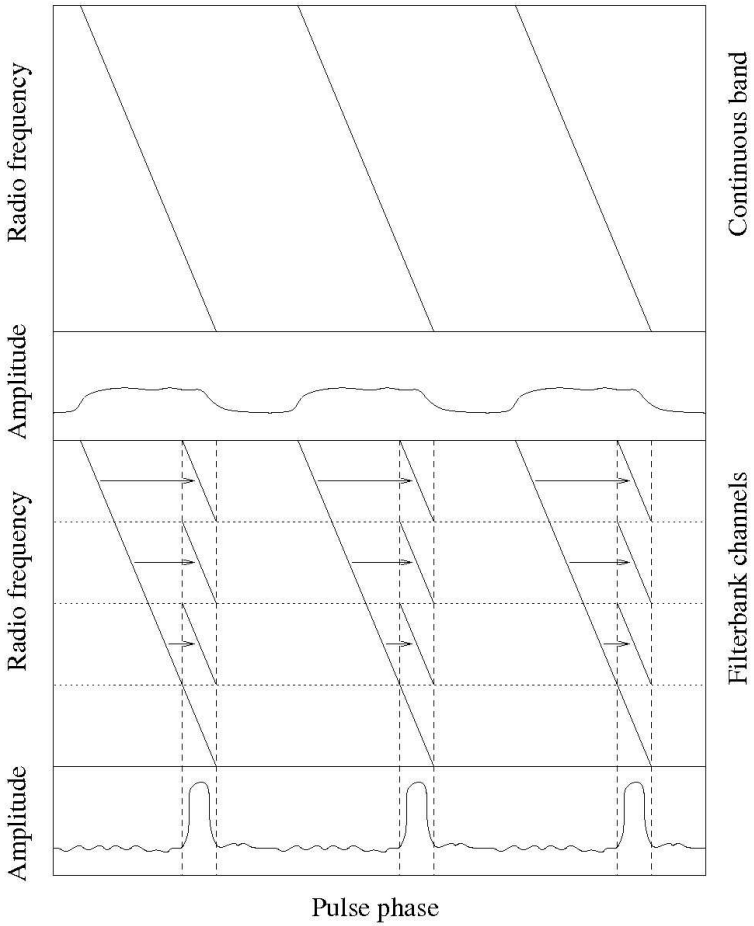
Où et à quelle fréquence chercher ?

Quelle zone du ciel privilégier ?
    le plan de la Galaxie ? les hautes latitudes galactiques ?
à basse fréquence les pulsars sont plus intenses
à haute fréquence le milieu interstellaire est moins limitant

Un traitement lourd

pour chaque observation (des milliers)
    dédisperser pour quelques milliers de valeurs de dispersion (DM)
        effectuer la Transformée de Fourier
        fouiller parmi les milliers de candidats
            pour $\sim$100 candidats, empiler et optimiser les paramètres
sélectionner les meilleurs des $\sim$100000 candidats pour des observations de confirmation

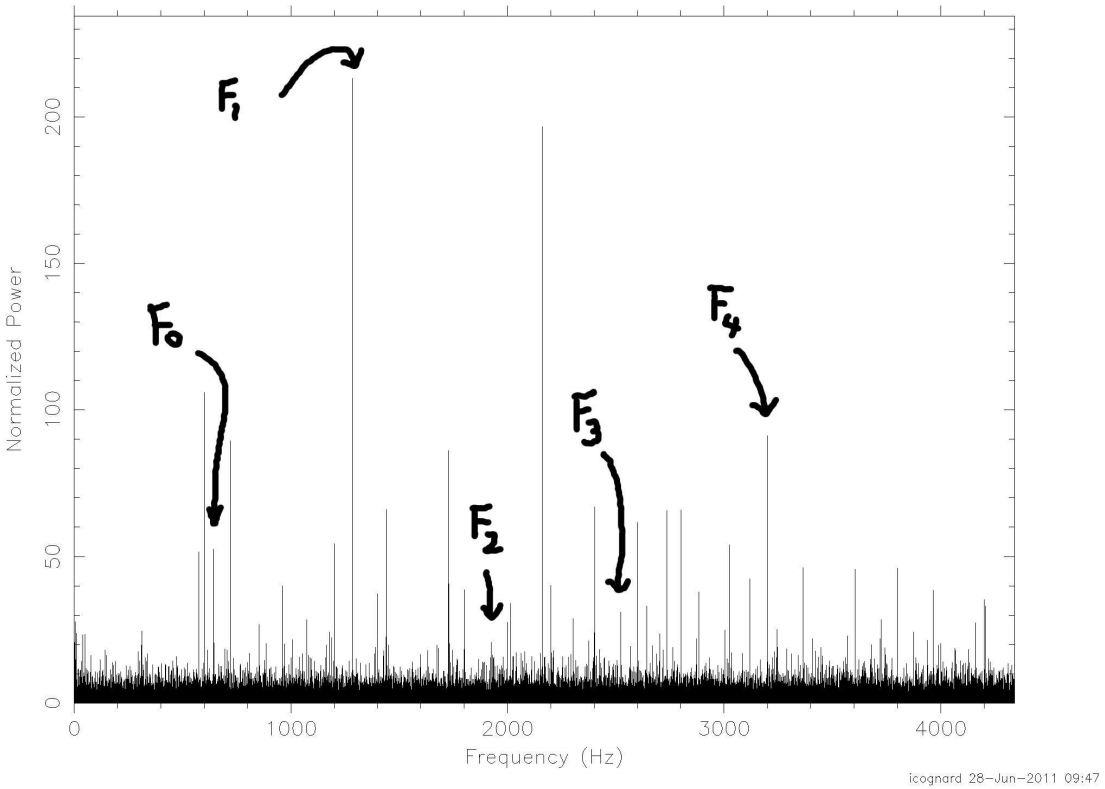
Dédisperser et intégrer les centaines de canaux



Dédisperser pour des milliers de DMs

Des algorithmes rapides ont été développés pour dédisperser rapidement pour plusieurs valeurs de dispersion (DM) en même temps.
Le choix de l'interval de DM dépend de la fréquence radio, de la largeur du canal individuel et de l'échantillonage temporel.

La FFT d'une série temporelle dédispersée



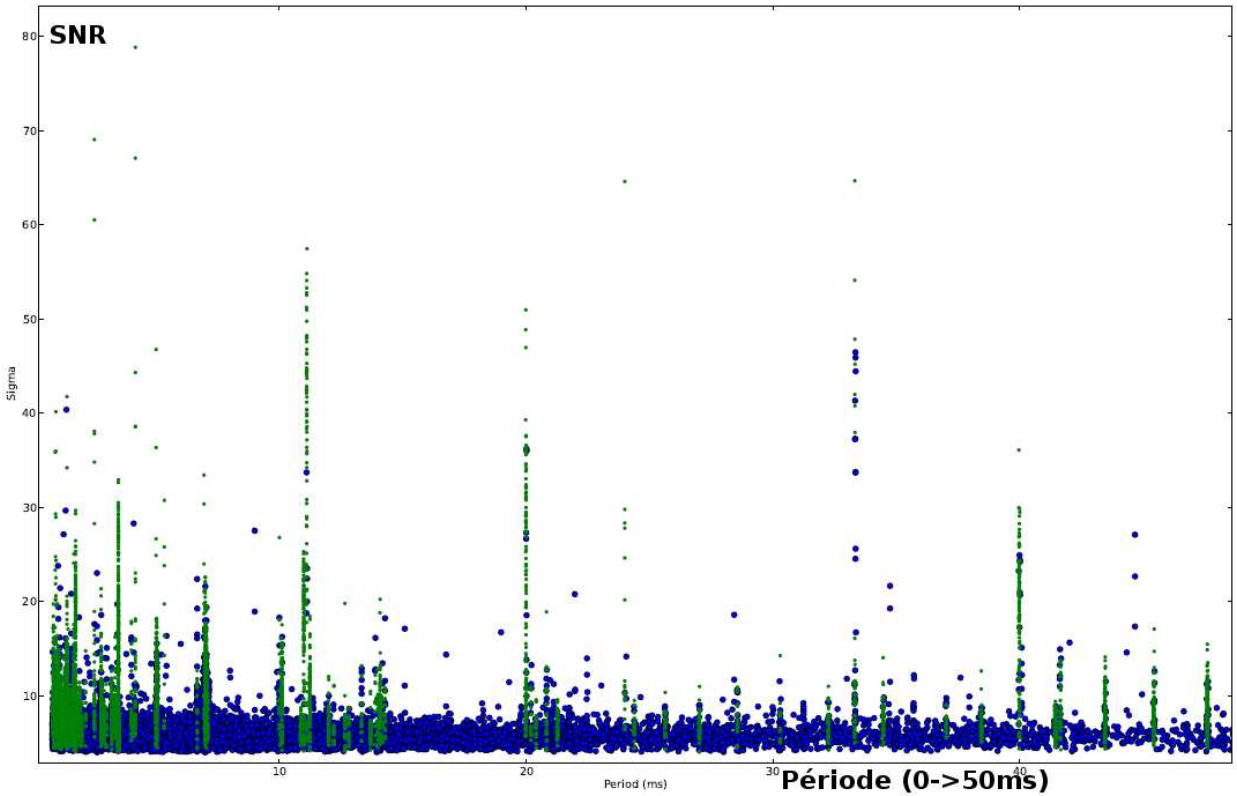
Détection de fréquences de rotation potentielles (avec sommation des harmoniques)
Regroupement de ces multiples candidats similaires trouvés pour des DMs voisins

Les difficultés du traitement

Il y a quelques points durs dans l'analyse

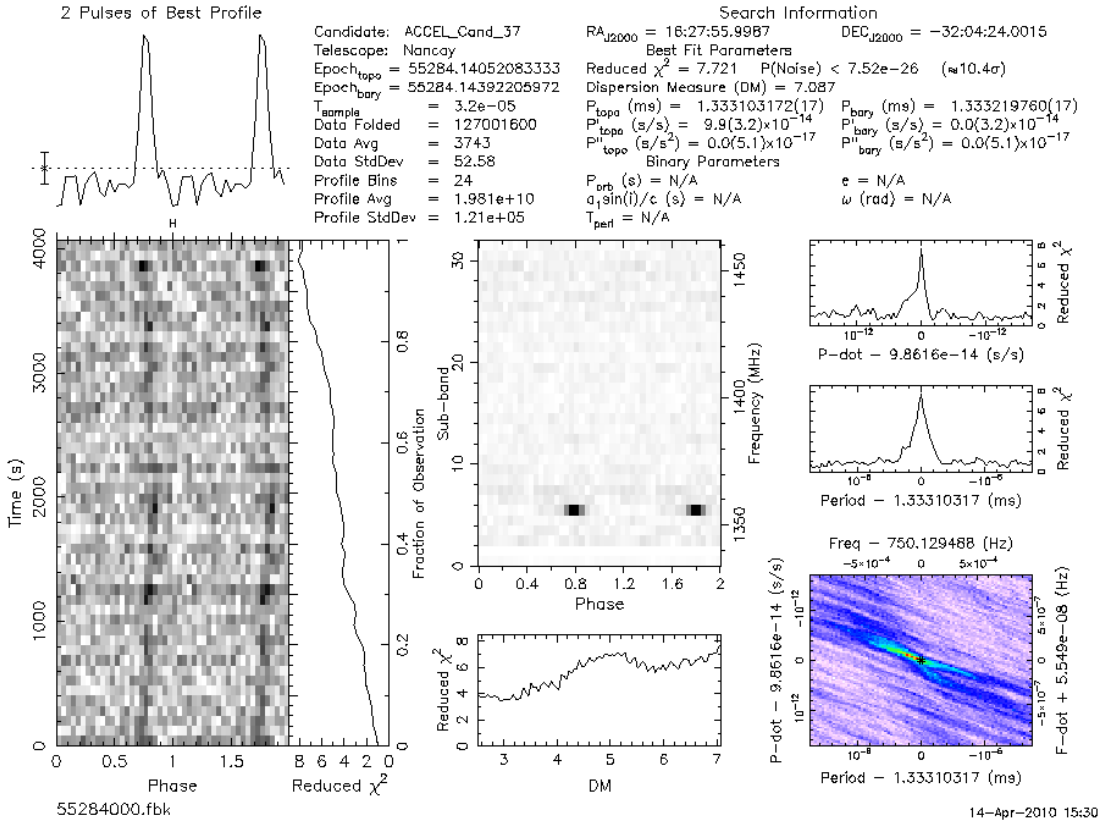
- enlever les parasites dans la FFT
- regrouper les candidats obtenus à différentes valeurs de dispersion et sélectionner le mieux possible les candidats à optimiser
- rechercher les meilleurs candidats parmi les très nombreux proposés

Regarder les candidats par lot



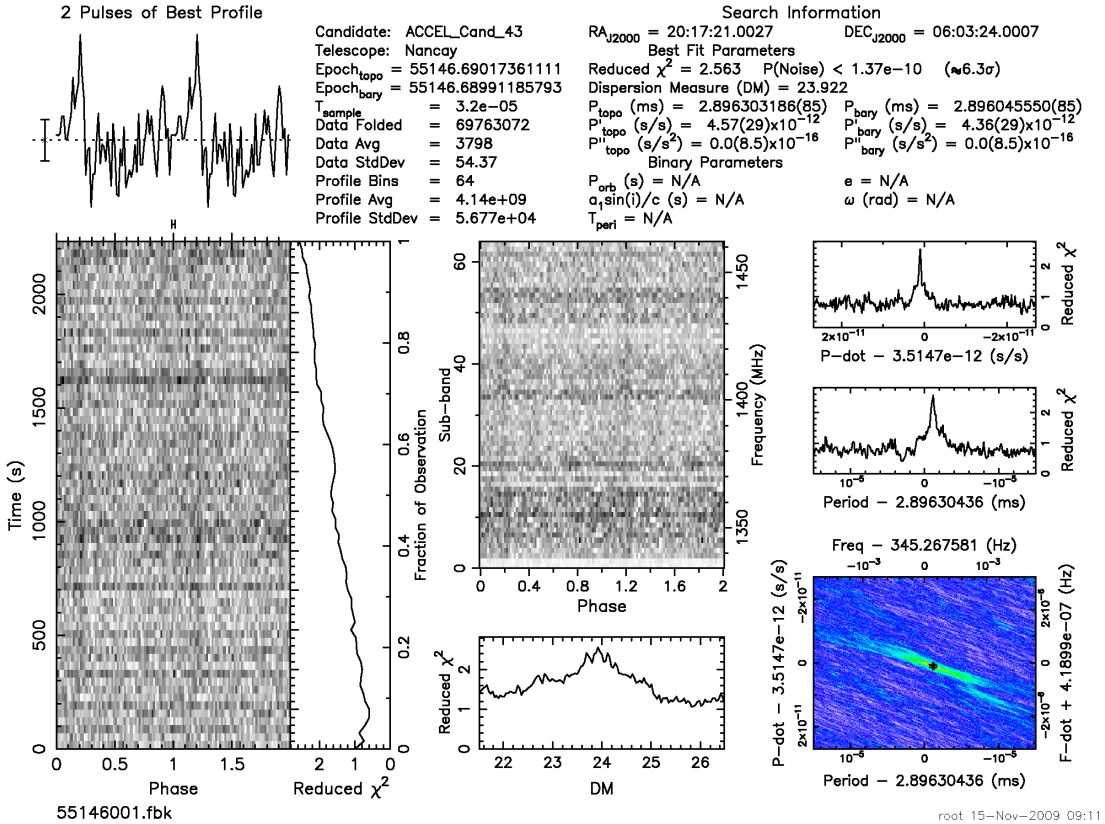
On analyse simultanément plusieurs centaines d'observations
avec une interface 'python' travaillant sur une base de données de candidats,
pour lancer des visualisations détaillées, marquer des candidats intéressants, et
reconnaitre facilement les parasites indésirables...

Un parasite



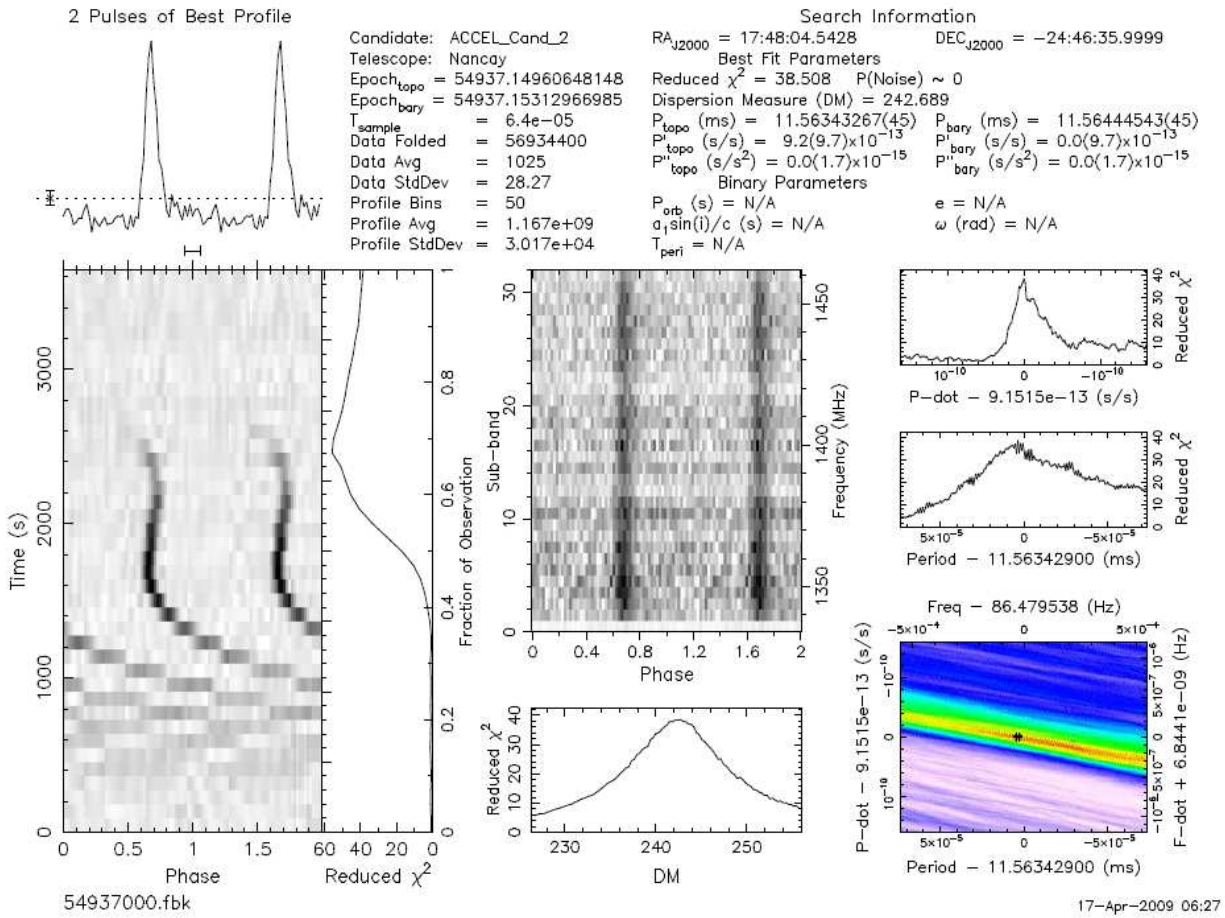
Un parasite relativement facile à reconnaitre car il est limité à un seul canal de fréquence

Un nouveau pulsar



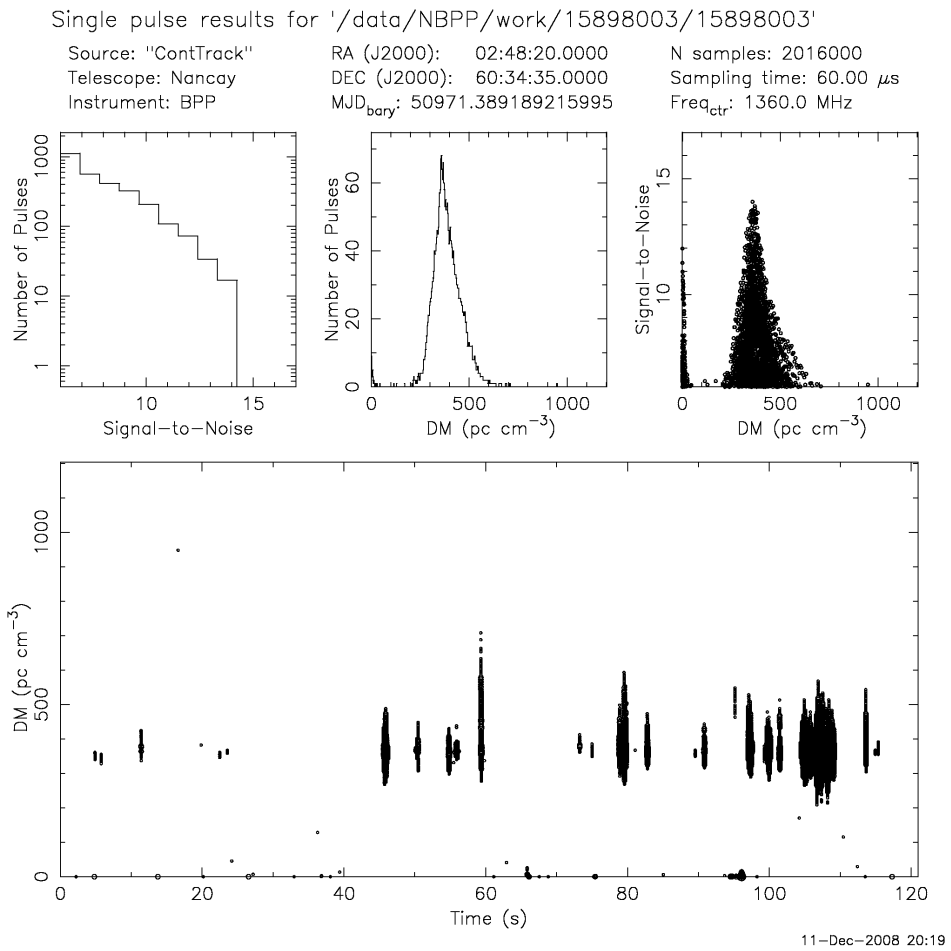
Un pulsar milliseconde trouvé au radiotélescope de Nançay (fin 2009)
Un fichier de 30Go de 128 canaux de 1MHz et 70×10^6 échantillons sur 4 bits pour une impulsion moyenne globale qui sort à 6.3 σ au-dessus du bruit.

Et si l'accélération varie...



Un pulsar dans un système binaire de période orbitale de 1.8h

Recherche d'impulsions individuelles



On recherche aussi les impulsions individuelles intenses...

Conclusion

De très gros programmes de recherches systématiques de nouveaux pulsars sont en cours dans les plus grands radiotélescopes du monde. Ce sont des milliers d'observations pour un volume de données total qui se chiffre en centaines de To...

La découverte d'un pulsar en couple avec un trou noir sera la récompense ultime !