

A la recherche de pulsars radio émetteurs de rayons gamma

D. Parent
Stagiaire au Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux-Gradignan
CNRS/IN2P3 - Université Bordeaux 1

Juin 2006

Responsable de stage : D.A. Smith

Objectif :

Rechercher des pulsars émetteurs de rayons gamma parmi les contreparties radio, à partir des outils d'analyse de l'expérience GLAST.



TABLE DES MATIERES

<i>Introduction</i>	<i>3</i>
1 Des étoiles à neutrons aux pulsars	3
1.1 Les étoiles à neutrons	3
1.1.1 La formation des étoiles à neutrons	3
1.1.2 La structure des étoiles à neutrons	5
1.2 La découverte des pulsars	5
1.3 Les pulsars	7
2 A partir des observations CGRO	8
2.1 Les observations EGRET	8
2.2 Les pulsars EGRET	9
2.3 Les modèles théoriques	10
2.3.1 Le modèle de la calotte polaire	10
2.3.2 Le modèle de la cavité externe	11
3 Le LAT de GLAST	12
3.1 Objectifs et dispositif	12
3.2 Les candidats pour le LAT	13
3.3 Le Data Challenge 2	13
3.4 Les outils d'analyse de DC2	14
3.5 Mise en évidence d'une pulsation	15
3.6 Analyse et résultats des données DC2	16
3.6.1 Recensement	16
3.6.2 Localisation	17
3.6.3 Sensibilité	18
3.6.4 Closeout	19
<i>Conclusion et perspectives</i>	<i>20</i>
<i>Remerciements</i>	<i>20</i>
<i>Bibliographie</i>	<i>21</i>

Introduction

Depuis des millénaires, le ciel et ses astres fascinent les hommes. Pourtant, ils sont restés longtemps aveugles au rayonnement électromagnétique autre que le visible. Ce n'est que depuis le 20^{ème} siècle, grâce aux progrès formidables de l'astronomie, que la quasi totalité du spectre a été dévoilée. A chaque étape, les astronomes ont découvert de nouvelles sources, comme les quasars et les pulsars. Ils ont aussi remarqué qu'à chaque processus physique de notre univers, on pouvait associer une longueur d'onde de rayonnement. Plus le phénomène est violent, plus il dégage de l'énergie.¹ L'évolution stellaire en est un bel exemple. A sa naissance, une étoile rayonne dans l'infrarouge, s'illumine dans le visible et quelques milliers d'années après leur explosion, les restes de supernovae émettent dans le gamma. GLAST, pour Gamma-ray Large Area Space Telescope, satellite dont le lancement est prévu en automne 2007, observera l'espace dans le domaine des hautes énergies (au delà du MeV). Il ouvre ainsi la possibilité d'appréhender les phases ultimes de l'évolution des étoiles massives que sont les supernovae, les trous noirs, les étoiles à neutrons ou les pulsars, sujet importants de recherche du groupe d'astroparticules du Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux-Gradignan (CENBG).

Les pulsars sont des étoiles à neutrons en rotation rapide, enveloppés d'une magnétosphère intense. Ce couplage crée un faisceau électromagnétique, dont le spectre peut s'étendre du domaine radio au gamma. L'un des objectifs de la mission GLAST et du groupe d'astroparticules est de comprendre le mécanisme de production de ce spectre dans le domaine des hautes énergies. Dans ce sens, j'introduirai ce rapport par une description sur la formation des pulsars et leur découverte qui tient du hasard. Puis, dans une seconde partie, je présenterai l'expérience Compton Gamma Ray Observatory (CGRO), qui a établi les connaissances actuelles sur l'astronomie haute énergie et les différents modèles théoriques élaborés pour décrire l'émission γ des pulsars. Enfin, j'ai eu l'opportunité de participer à une des phases de préparation de GLAST, le Data Challenge 2. Son objectif est de construire et de perfectionner les outils d'analyse des futures données GLAST. Cette étape s'appuie sur la simulation d'un ciel gamma, vu par le satellite. J'ai ainsi mis en place une procédure permettant d'évaluer la pulsation des pulsars gamma présents dans cette simulation, à partir des caractéristiques dynamiques des pulsars radio. Finalement, à l'aide des résultats obtenus, j'ai pu mener une étude sur la localisation de ces sources gamma et la sensibilité de notre détection. Tout ce travail fera l'objet de ma troisième partie.

1 Des étoiles à neutrons aux pulsars

1.1 Les étoiles à neutrons

1.1.1 La formation des étoiles à neutrons

Autour de 1910, les physiciens Ejnar Hertzsprung et Henry Norris Russell ont proposé, après de nombreuses observations du ciel, un diagramme présentant la magnitude absolue

¹Pour les processus physiques dont l'énergie est supérieure au MeV, les mécanismes d'émission ne sont plus thermiques.

en fonction de la température des étoiles (figure 1). Le diagramme montre que celles-ci se répartissent en trois groupes bien distincts : la séquence principale, les géantes et les naines. Cette représentation permet ainsi d'illustrer l'évolution stellaire, exposée ci-dessous.

Le destin d'une étoile est lié à sa masse. Plus elle est massive, moins elle passe de temps dans la séquence principale. Une étoile de quinze masses solaires brille quelques dizaines de millions d'années au plus. Pendant cette phase, l'étoile synthétise des noyaux d'hélium à partir de protons. Quand les noyaux d'hydrogène viennent à manquer, la pression radiative qui compense l'attraction gravitationnelle chute. Le coeur se contracte et augmente en température, permettant la combustion de l'hélium. Ce phénomène s'accompagne de l'expansion et du refroidissement des couches externes. L'étoile devient une géante rouge (en haut à droite du diagramme HR).

Pour les étoiles supérieures à 8 masses solaires, la fusion thermonucléaire d'éléments de plus en plus lourds va continuer, jusqu'à créer un coeur de fer. La nucléosynthèse de tout autre élément plus lourd ne produit pas d'énergie, au contraire elle en consomme. A ce stade, la pression radiative créée par l'énergie nucléaire s'arrête. Le coeur s'effondre créant une onde de choc qui expulse les couches supérieures de l'étoile. C'est une supernova. Si le coeur a une masse comprise entre 1,4 et 5,5 masses solaires, il se stabilise en étoile à neutrons, grâce à la pression de dégénérescence des neutrons qui balance l'attraction gravitationnelle.

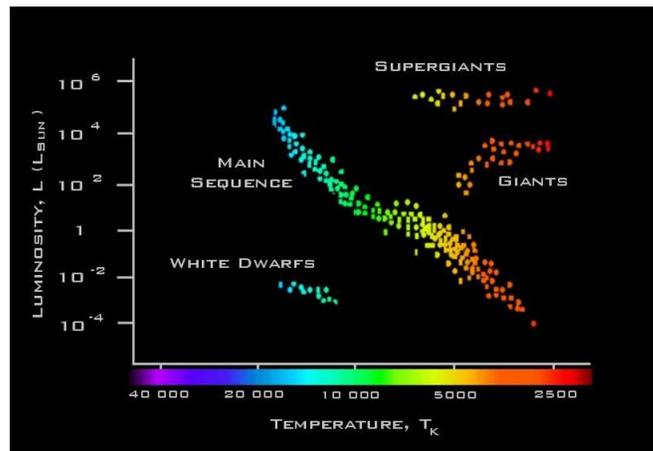


Figure 1: Diagramme d'Hertzsprung-Russell

Etude sur la masse d'une étoile à neutrons

La limite inférieure de la masse d'une étoile à neutrons est la masse de Chandrasekhar égale à $1,4 M_{\odot}$ [7]. Elle correspond à la limite supérieure jusqu'à laquelle la pression de dégénérescence des électrons relativistes compense la pression gravitationnelle. Au dessus de cette masse, cette pression ne peut empêcher l'effondrement et les électrons se combinent avec les protons pour former des neutrons.

Pour calculer la limite supérieure de la masse avant l'effondrement en trou noir, on applique

le même raisonnement que précédemment. L'hypothèse est de considérer des neutrons dégénérés et relativistes. La relation d'incertitude d'Heisenberg (1) nous renseigne sur le minimum de la séparation des neutrons, qui correspond à leur état dégénéré.

$$a \simeq \frac{\hbar}{p} \quad (1)$$

où p est la quantité de mouvement. En appliquant cette relation, l'énergie d'une particule ultra-relativiste devient :

$$E_{rela} = \frac{\hbar c}{a} \quad (2)$$

Le théorème du Viriel (3) énonce que pour un système en équilibre dynamique, son énergie potentielle gravitationnelle est égale à deux fois son énergie cinétique.

$$E_P = 2E_C \quad (3)$$

Pour un astre autogravitant à symétrie sphérique, si l'on fait l'approximation d'un corps homogène $\rho(r) = const$, l'énergie potentielle gravitationnelle, en théorie newtonienne, est donnée par $E_P = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R}$ et l'énergie cinétique pour les N_n neutrons de l'étoile est définie par $E_C = N_n E_{rela}$. En appliquant le théorème du Viriel, on obtient une limite supérieure de la masse :

$$M_{lim} = \left(\frac{10\hbar c}{3G}\right)^{3/2} \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/2} \frac{1}{m_n^2} = 5,5M_\odot \quad (4)$$

L'encadrement de la masse d'une étoile à neutrons obtenu est :

$$1,4M_\odot < M_{E.N.} < 5,5M_\odot$$

1.1.2 La structure des étoiles à neutrons

Une étoile à neutrons est un astre autogravitant en équilibre hydrostatique. Elle est dénuée de réactions nucléaires, et c'est la pression de dégénérescence des neutrons qui compense l'énorme force gravitationnelle ($\sim 10^{10}$ fois le soleil). Avec une masse comprise entre 1,4 et 5,5 M_\odot pour un diamètre de 10 km environ, sa masse volumique moyenne est de l'ordre de la densité nucléaire ($\sim 10^{15} \text{ g.cm}^{-3}$), d'où l'appellation d'objets compacts [7]. L'étoile possède également un champ magnétique intense d'environ $\sim 10^{12}$ Gauss, qui couplé à la rotation de l'étoile, crée un plasma de particules chargées.

La composition interne de l'étoile, dans un cas très schématique, peut être considérée comme un plasma neutronique. Les différentes théories, s'accordent sur une structure en couches, comme le montre la figure 2 (pour plus de précision voir [6]).

1.2 La découverte des pulsars

En juillet 1967, Antony Hewish et son étudiante Jocelyn Bell de l'Université de Cambridge, observent la scintillation des radiosources extragalactiques. Leur objectif est de différencier les

²Les mesures actuelles de la masse des étoiles à neutrons se situent toutes autour de 1,4 M_\odot [7]

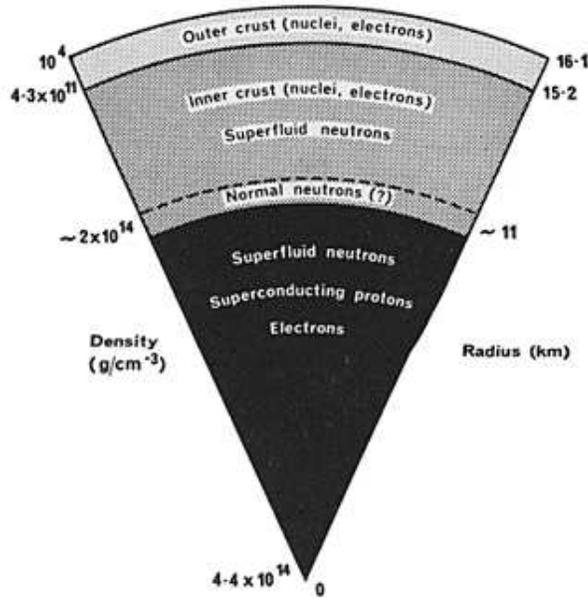


Figure 2: Structure interne d'une étoile à neutrons

quasars des radio-galaxies. Pour ces observations, ils ont construit un radiotélescope suffisamment sensible aux variations d'un signal dans le temps. Par hasard, J. Bell découvre une source qui émet de façon constante et régulière des impulsions radios. Ils s'interrogent sur l'origine de cette source et déduisent rapidement une origine céleste. Les observations suivantes confirment un signal extrêmement stable dont la périodicité est de 1.337 secondes. A. Hewish et ses collègues identifient finalement ce rayonnement électromagnétique à une étoile à neutrons en rotation. Aujourd'hui, la source radio d'Hewish et Bell est appelée PSR B1919+21³.

La découverte confirme les prédictions faites dans les années trente par Walter Baade et Fritz Zwicky sur les étoiles à neutrons au sein des supernovae et est rapidement confortée par l'observation du pulsar situé dans la nébuleuse du Crabe. Rapidement, les astronomes du monde entier se mettent à les débusquer par centaines.⁴ A la suite, ils entreprennent une recherche dans d'autres domaines d'énergie. Dans le visible, ils ne découvrent qu'un seul pulsar : le pulsar du Crabe. L'astronomie gamma, quant à elle, ne démarre qu'en 1972 avec la sonde SAS-2. Cette première mission de ce genre confirme l'existence d'un rayonnement isotrope de hautes énergies, mais aucune émission pulsée. Trois ans plus tard, l'Agence Spatiale Européenne (ESA) met en orbite le satellite COS-B qui établit la première carte du ciel et la mise en évidence d'un certain nombre de sources d'intenses émissions gamma, dont le pulsar du Crabe et un pulsar qui n'a pas de contrepartie radio : Geminga. Cependant, c'est en 1991 que l'observatoire spatial Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) a permis d'améliorer considérablement les connaissances sur les pulsars. Nous y reviendrons dans la deuxième partie.

³PSR signifie "Pulsating Source of Radio". **B1919+21** correspond aux coordonnées du pulsar pour l'équinoxe de 1950, l'ascension droite est 19h 19 min et sa déclinaison +21°.

⁴On compte aujourd'hui plus de 1600 pulsars émetteurs radio.

1.3 Les pulsars

Comme vu précédemment, les pulsars sont des résidus de supernova. La définition la plus simple que l'on puisse donner d'un pulsar est une étoile à neutrons en rotation rapide entourée d'une magnétosphère intense. Pendant la phase de supernova, l'étoile passe de quelques millions de kilomètres de rayon à une dizaine. La conservation du moment cinétique conduit à une rotation extrêmement rapide de l'étoile sur elle-même, par exemple le pulsar du Crab a une fréquence de 30 tours/s. De même, le champ magnétique intense provient de la conservation du flux magnétique. Ce couplage induit un environnement, où les électrons arrachés de la surface de l'étoile sont accélérés et émettent des photons selon un faisceau étroit. L'axe de rotation et l'axe magnétique n'étant pas forcément alignés, le signal est perçu périodiquement vu de la Terre. L'analogie avec un phare marin est raisonnable.

Une caractéristique importante est le domaine en énergie du rayonnement électromagnétique détecté. Il appartient à un ou plusieurs intervalles d'énergie, la majorité sont observés en radio, beaucoup en X, et quelques uns le sont en optique et gamma. Son observation a notamment permis de déterminer diverses propriétés physiques des pulsars comme leur période, leur âge, leur population ou leur distribution dans notre galaxie (cf. 2.1.1).

Remarque : Les pulsars sont soumis à des "glitches".⁵ Ce sont des changements brutaux de la rotation de l'étoile, liés hypothétiquement à leur composition interne. Le phénomène est constaté plus souvent pour des jeunes pulsars (exemple : le pulsar du crabe).

Illustration d'une pulsation

Le pulsar détecté par J.Bell avait un flux de photons radio particulièrement intense, ainsi chaque pulse se démarquait du bruit de fond. Comme ce n'est pas le cas de tous les pulsars, les astrophysiciens ont développé une méthode qui met en évidence une pulsation : le phasogramme ou la courbe de lumière.

La construction d'un phasogramme nécessite de connaître certains paramètres. Ces éphémérides incluent la position, la fréquence, la dérivée de la fréquence et l'époque de validité. On ajoute à cela la barycentrisation, qui corrige le temps d'arrivée des photons, dû au mouvement de l'observatoire par rapport à l'astre. Pour la quasi totalité des pulsars connus, le flux de photons dans le domaine radio est assez élevé pour les déterminer⁶. La fréquence de rotation du pulsar en est le principal, elle est déterminée par une transformée de Fourier à un instant t_0 de référence. A cela, on rajoute ses dérivées, qui sont obtenues par des mesures de la fréquence pour différentes dates.

Connaissant la fréquence de rotation de l'étoile, la durée d'un tour est déterminée. On empile les photons qui arrivent à la même fraction de tour. Si deux photons ont exactement une période du pulsar de différence, ils sont amassés au même endroit. Ainsi la présence d'une émission pulsée se traduit par une accumulation prononcée de photons dans un canal, même

⁵Glitch signifie "bruit de chronométrage"

⁶Pour Geminga, pulsar gamma sans contrepartie radio, on utilise les éphémérides mesurées dans le domaine des X.

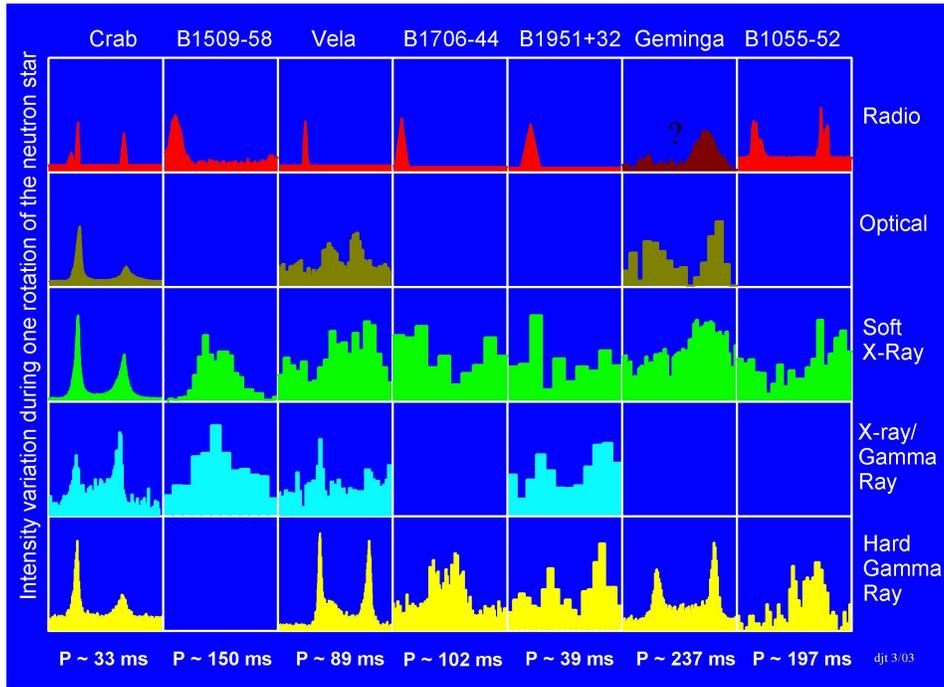


Figure 3: Courbes de lumière des pulsars détectés par le télescope EGRET, du domaine radio au rayonnement gamma de haute énergie.

avec un bruit de fond. Par convention, la phase à l'origine correspond au pic radio. La figure 3 représente les courbes de lumière des pulsars détectés par l'expérience EGRET, du domaine radio au rayonnement gamma de haute énergie.

Remarque : En développant en série de Taylor la fréquence (5), celle-ci peut être déterminée à une date relativement éloignée du jeu d'éphémérides du pulsar. Néanmoins, sa validité par extrapolation n'est pas infinie, à cause des glitches, du développement limité à l'ordre 2 et des incertitudes.

$$f(t) = f(t_0) + \frac{df(t_0)}{dt}(t - t_0) + \frac{1}{2} \frac{d^2f(t_0)}{dt^2}(t - t_0)^2 \quad (5)$$

2 A partir des observations CGRO

2.1 Les observations EGRET

La seule information qui nous parvient des pulsars provient de leur faisceau électromagnétique. Dans les années 70, avec les photons détectés en radio, les astrophysiciens ont élaboré des modèles théoriques. La connaissance d'un seul domaine d'énergie a tout de même limité leur évolution, en dépit de la mission COS-B. C'est en 1991, que le satellite spatial Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) a marqué un tournant dans l'astronomie gamma, en observant 6 décades en énergies (de 30 keV à 30 GeV). Prédecesseur de l'expérience GLAST, la mission CGRO comptait à son bord quatre expériences de haut niveau technologique : BATSE détecteur de sursauts gamma, COMPTEL, OSSE, et EGRET la plus haute en énergie (100

MeV à 30 GeV) qui a établi le premier catalogue des sources émettrices au-dessus de 100 MeV⁷, comportant 66 noyaux actifs de galaxie et 6 pulsars⁸(cf. figure 4).

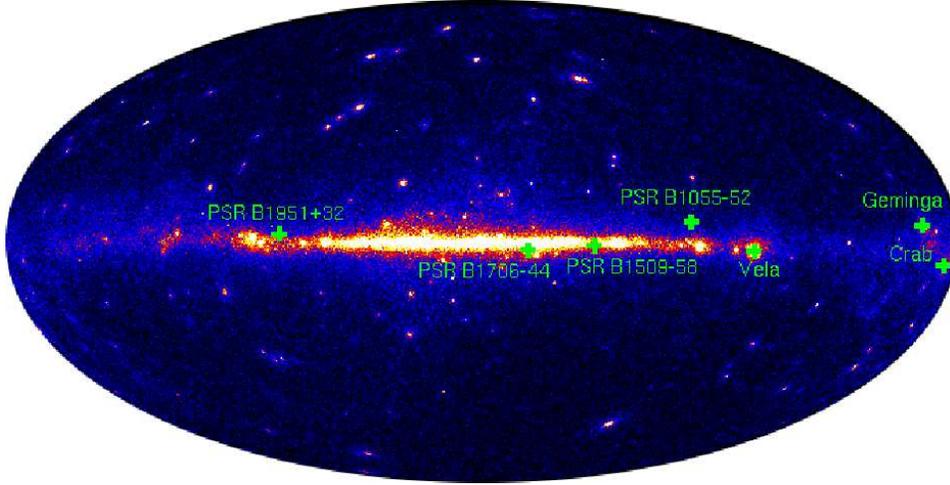


Figure 4: Carte du ciel en rayonnement gamma créée à partir de la simulation DC2 de GLAST, en coordonnées galactiques. Les 6 pulsars détectés par EGRET sont représentés. Les noyaux actifs de galaxie apparaissent en dehors du plan galactique.

Le télescope spatial EGRET a donc permis une grande avancée des connaissances en astronomie gamma et par conséquent d'améliorer les modèles théoriques des pulsars, qui seront présentés par la suite. Ainsi, la mission est de par sa grande réussite et sa similitude avec GLAST, un passage essentiel dans notre programme de recherche sur les pulsars gamma.

Remarque : GLAST successeur d'EGRET a utilisé toutes les connaissances acquises pour la simulation du ciel gamma du Data Challenge 2 (étape préliminaire de l'expérience GLAST décrit dans la dernière partie).

2.2 Les pulsars EGRET

L'analyse des données obtenues par EGRET est essentielle, autant pour comprendre les propriétés générales des pulsars, que pour prévoir les futurs résultats de la mission GLAST (cf. table 1). Notamment, les **spectres en énergie** renseignent sur la coupure en énergie des photons émis au sein de la magnétosphère et indirectement sur le mécanisme de production des photons pulsés, et les **courbes de lumières** renseignent sur la géométrie du faisceau. Ce sont deux analyses fondamentales dans l'étude des pulsars. Les paragraphes suivants présentent l'application de ces analyses aux pulsars détectés par EGRET.

Quelques caractéristiques des pulsars EGRET sont données dans la table 1, classés selon leur âge $\tau = \frac{P}{2\dot{P}}$ (avec P la période de rotation du pulsar). On rajoute à cela, PSR B1509-58

⁷Le catalogue compte 271 sources gamma, 170 n'ont pas été identifiées à cause de la mauvaise localisation de l'instrument [5].

⁸Ici, le rayonnement gamma n'est pas thermique mais est dû à la rotation couplée à la magnétosphère du pulsar.

qui a été observé à plus basse énergie par le détecteur COMPTEL.

Nom	Coordonnées gal.(deg)	D (kpc)	P (ms)	$\log\tau$ (ans)
<i>PSR_B0531p21 - Crab</i>	(83.64 , 22.01)	2.0	33.403	3.1
<i>PSR_B1509 - 58</i>	(320.3 , -1.2)	4.4	150.658	3.2
<i>PSR_B0833m45 - Vela</i>	(128.83 , -45.18)	0.5	89.315	4.1
<i>PSR_1706m44</i>	(257.43 , -44.49)	1.8	102.450	4.2
<i>PSR_B1951p32</i>	(68.8 , 2.8)	2.5	39.530	5.0
<i>PSR_J0633p1746 - Geminga</i>	(98.48 , 17.78)	0.16	237.093	5.5
<i>PSR_B1055m52</i>	(164.49 , -52.45)	1.5	197.108	5.7

Table 1: Pulsars gamma identifiés par le détecteur EGRET et COMPTEL sur CGRO classés dans l'ordre croissant de leurs âges. De gauche à droite, le nom du pulsar, les coordonnées galactiques (latitude l et longitude b), la distance, la période et l'âge.

Les courbes de lumières

Les courbes de lumière associées aux pulsars EGRET sont présentées en figure 3, du domaine radio au rayonnement gamma de haute énergie. La partie **Hard Gamma Ray** représente la détection d'EGRET. On constate dans cette gamme d'énergie qu'ils présentent tous un profil à deux pics. A l'opposé et à l'exception du Crabe et de PSR B1055m52, ils sont formés d'un seul pic radio. Ces observations orientent l'hypothèse d'une émission en forme de cône, avec à l'extérieur l'émission gamma et au centre l'émission radio.

2.3 Les modèles théoriques

Deux théories les plus souvent citées pour décrire les processus d'accélération et d'émission gamma des pulsars sont le modèle de la calotte polaire et le modèle de la cavité externe. Ils ont été élaborés dans les années 70, puis perfectionnés dans les années 90 grâce aux données EGRET. Dans ces modèles, on considère une étoile à neutrons en rotation rapide sur elle-même avec une vitesse angulaire Ω . Proche de la surface, le champ magnétique crée une magnétosphère composée d'un plasma chargé, dont les lignes de champ sont en corotation avec l'étoile. Il existe des zones où un déficit de charges apparaît, et permet la création d'un champ électrique capable d'accélérer les particules. Selon l'énergie de ces particules, elles rayonnent dans une certaine gamme. Les deux modèles se différencient par leur lieu d'émission et par leur coupure du spectre autour du GeV.

2.3.1 Le modèle de la calotte polaire

Dans le modèle de la calotte polaire ou "Polar cap", les cavités accélératrices se trouvent aux pôles magnétiques (cf. figure 5). Les électrons arrachés de la calotte créent avec les photons X thermiques de la surface, des photons γ qui eux-mêmes se matérialisent en paires électron positron. Ce phénomène produit un champ électrique intense, dans laquelle les électrons sont accélérés. Couplés avec le champ magnétique dont les lignes de champ sont courbes, les électrons perdent de l'énergie par rayonnement de courbure. Les photons émis sont alignés

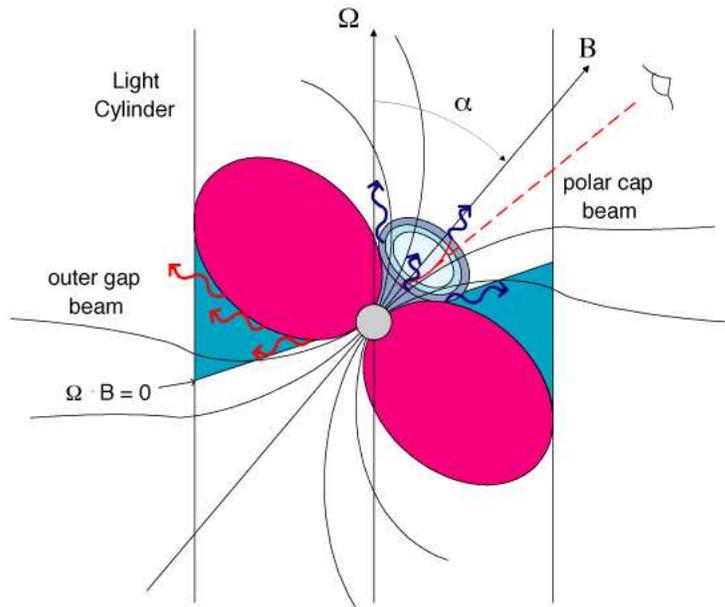


Figure 5: Modèles "Polar cap" et "Outer gap". La zone circulaire au dessus du pôle magnétique représente la zone d'accélération du modèle de la calotte polaire.

aux lignes de champ magnétique et peuvent éventuellement sortir de la magnétosphère. Ce processus engendre une coupure du spectre vers 10 GeV.

2.3.2 Le modèle de la cavité externe

Le modèle de la cavité externe ou "Outer gap" situe la cavité accélératrice loin des pôles du pulsar entre le cylindre de lumière⁹, la dernière ligne de champ fermée et la surface de neutralité définie par $\vec{\Omega} \cdot \vec{B} = 0$ (cf. figure 5). Comme dans le modèle "polar cap", les électrons arrachés de la surface, s'échappent le long des lignes de champ magnétique et créent par interaction avec les photons ambiants, des paires électrons positrons. La différence de potentiel induit un champ électrique qui accélère les particules chargées, qui produisent par émission synchrotron ou Compton inverse des photons de haute énergie. La cavité accélératrice étant plus éloignée que dans le modèle précédent, la production de paire par interaction avec le champ magnétique sera plus faible, donc les photons émis auront des énergies plus élevées.

Les modèles se distinguent donc par leur endroit d'émission gamma et leur spectre en énergie. Aujourd'hui le manque de données ne permet pas de départager voire de valider ces modèles. L'expérience GLAST a pour ambition de lever cette dégénérescence.

⁹La corotation de l'étoile induit qu'à une certaine distance, les lignes de champ devrait être égale à la vitesse de la lumière. Elles restent donc ouvertes. La distance limite s'appelle le cylindre de lumière.

3 Le LAT de GLAST

3.1 Objectifs et dispositif

GLAST, pour Gamma-ray Large Area Space Telescope est un satellite spatial mais aussi un projet de collaboration internationale dont font partie la France, l'Italie, la Suède, le Japon et les USA. Financé essentiellement par la NASA et le DOE (Departement Of Energy), le lancement du satellite est prévu pour l'automne 2007. La mission a pour but d'améliorer les connaissances en astronomie gamma. A son bord deux détecteurs complémentaires : le Large Area Telescope (LAT) pour observer le ciel des hautes énergies et le GLAST Burst Monitor (GBM) pour étudier les sursauts gamma plus enclin aux émissions transitoires intenses.

Objectifs de la mission GLAST :

- Comprendre les mécanismes d'accélération des particules dans les AGN, les pulsars et les restes de supernova. Notamment, on s'attend à détecter des milliers de blazars.
- Identifier les sources ponctuelles et les émissions diffuses.
- Déterminer le comportement des sursauts gamma.
- Détecter par l'observation d'une raie d'annihilation la matière noire.

Description du LAT

16 ans après le décollage de CGRO, les techniques de détection ont évolué. Le télescope EGRET était composé d'une chambre à étincelles qui permettait de reconstituer la direction du photon incident, déterminant une source à 60 arcmin. 25 fois plus sensible, le LAT observera le ciel dans un intervalle d'énergie de 20 MeV à 300 GeV et couvrira sa totalité au cours de deux orbites de 95 minutes. Il est composé de deux structures instrumentales qui se superposent. Un trajectographe¹⁰ détermine la direction du photon d'arrivée et un calorimètre mesure son énergie. Le CNRS/IN2P3 et notamment le CENBG ont contribué à la réalisation et la caractérisation de ce calorimètre, composé de 8 couches croisées de 12 cristaux d'iodure de césium (CsI) très dense. Lorsque le cristal CsI est dopé au thallium, il scintille de la lumière bleue lors du passage d'une particule ionisante. Cette lumière est capté par des photodiodes à chaque bout des cristaux.

Avec une géométrie mieux adaptée, le LAT prétend discerner une source à haute latitude galactique, à moins de 0,5 arcmin pour un an de données. Il devrait identifier avec précision les sources non identifiées d'EGRET. Perpétuellement bombardé du rayonnement cosmique, le trajectographe est protégé par un détecteur d'anticoïncidence, lui permettant de séparer les photons des particules chargées.

¹⁰C'est le plus grand détecteur silicium réalisé à ce jour, avec 1 million de voies électroniques. Très compact, il possède un grand champ de vue, qui est un atout pour GLAST.

Model	Radio-loud	Radio-quiet
Slot gap	304	258
Outer gap	78	740

Table 2: Prédiction sur la détection à partir des modèles "slot gap" et "outer gap".

3.2 Les candidats pour le LAT

A la vue des observations, la fréquence de rotation d'un pulsar est maximale à sa naissance, et diminue au fur et à mesure de sa vie.¹¹ Ce ralentissement $\frac{df}{dt} < 0$ équivaut à une perte d'énergie du pulsar $\frac{dE}{dt}$, celle-ci étant proportionnelle à la luminosité selon la relation 6 [12].

$$L_{\gamma} \sim \frac{dE}{dt} \quad (6)$$

Les 6 pulsars détectés par EGRET ont un fort ralentissement, supérieur à 1.10^{34} erg/s. Cela laisse à supposer que plus le ralentissement est fort, plus la détection en gamma est envisageable. De plus, l'analyse d'un dipôle en rotation montre que pour un ralentissement supérieur à cette valeur, la luminosité augmente comme :

$$L_{\gamma} \sim \sqrt{\frac{dE}{dt}} \quad (7)$$

Les données gamma semblent être en accord [13]. En s'appuyant sur la base de données de pulsars Australia Telescope National Facility, ATNF Pulsar [11], et appliquant le critère :

$$\frac{\sqrt{\dot{E}}}{d^2} > 1\% * \frac{\sqrt{\dot{E}}}{d^2}_{Crab} \text{ ou } \dot{E} > 10^{-34},$$

une liste de 138 pulsars visibles depuis Nançay ($\delta > 39^\circ$) a été établie [8]. La demande de suivi systématique de ces candidats gamma avec le grand télescope de Nançay a été soumise, dans l'intention de devenir un programme clef.

Remarque : Les pulsars candidats à une émission gamma sont jeunes et turbulents, et sont sujets à un bruit de chronométrage important. Pour cette raison, il faut re-mesurer leurs éphémérides jusqu'à plusieurs fois par an pour certains. De plus, il s'avère que les plus beaux candidats sont faibles en radio ($S < 100 \mu Jy$ à 1400 MHz) et demandent des longs temps de pose.

3.3 Le Data Challenge 2

La mise en place d'une expérience telle que GLAST demande une préparation préalable importante. Le Data Challenge 2 (DC2)¹² s'oriente vers l'élaboration et le contrôle des procédures d'analyse des données GLAST. Il démarre d'une simulation du ciel en rayonnement gamma pour une durée totale de 55 jours (cf. figure 4). Toutes les sources attendues d'émission gamma sont incluses - blazars, pulsars, sursauts gamma, matière noire, plérions, restes de supernova et les fonds diffus galactique et extragalactique.

¹¹Dans les systèmes binaires, certains pulsars accrètent de la matière à leur compagnon et accélèrent par transfert de moment angulaire. Ce sont les pulsars millisecondes.

¹²<https://confluence.slac.stanford.edu/display/DC2/Home>

Une partie du groupe d'astroparticules du CENBG s'est orientée vers l'étude des pulsars, suite logique à l'expérience CELESTE. Les courbes de lumière peuvent mettre en évidence une pulsation. Dans le cadre du Data Challenge 2, les éphémérides radio de 98 pulsars sont mises à notre disposition, en rapport avec la simulation.

Le modèle de la simulation : slot gap

Les modèles théoriques présentés dans la deuxième partie sont relativement complexes pour être utilisés dans la simulation. Des pulsars ont été simulés à partir d'un modèle simple : le slot gap. Le modèle s'appuie sur le modèle de la calotte polaire, en définissant la zone d'émission comme un cône. Les différents processus de rayonnement sont l'émission synchrotron et le rayonnement de courbure.

3.4 Les outils d'analyse de DC2

L'observation continue du télescope entraîne un flot important de données (énergie et direction du photon, pour ne citer que les plus importantes). Pour une étude de ces données, une série d'outils d'analyse a été mise en place : les ScienceTools¹³. Notre méthode de détection se base en partie sur ces outils énumérés et définis succinctement :

ScienceTools

- **gtselect** : Sélectionne une région du ciel, l'intervalle d'énergie.
- **gtbary** : Barycentrisation.
- **gtpcomp** : Extrapole les éphémérides de la cible jusqu'à la date choisie.
- **gtpsearch** : Recherche de fréquence par une transformée de Fourier.
- **gtpphase** : Permet de créer le phasogramme du pulsar à partir des éphémérides.
- **gtsrcid** : Recouvrement des sources des catalogues.
- **gtlikelihood** : Réalisation de spectre en énergie.
- **gtobssim** : Permet de simuler des sources gamma (exemples : pulsars, AGN, fonds diffus galactique et extragalactique).

L'outil gtrtpulsar

Encadré par le groupe d'astroparticules, j'ai mis en place une analyse automatique **gtrtpulsar**, qui reprend les ScienceTools nécessaires pour chercher une pulsation. Ce script informatique (mélange de shell, de C++ et de Root) permet d'avoir une vision complète de la cible. Le résultat de cet outil est le point de départ de la mise en évidence d'un pulsar. Un extrait de la sortie de **gtrtpulsar** est présenté figure 6 et le logiciel est accessible sur [10].

Description générale :

Chaque page est divisée en quatre parties distinctes. La première décrit quantitativement les éphémérides du pulsar et les paramètres appliqués. La deuxième partie est une carte du ciel centrée sur la cible. Un cercle est juxtaposé indiquant la région analysée. Additionné à

¹³Outils basés sur les très répandus "ftools", traitement des fichiers "fits".

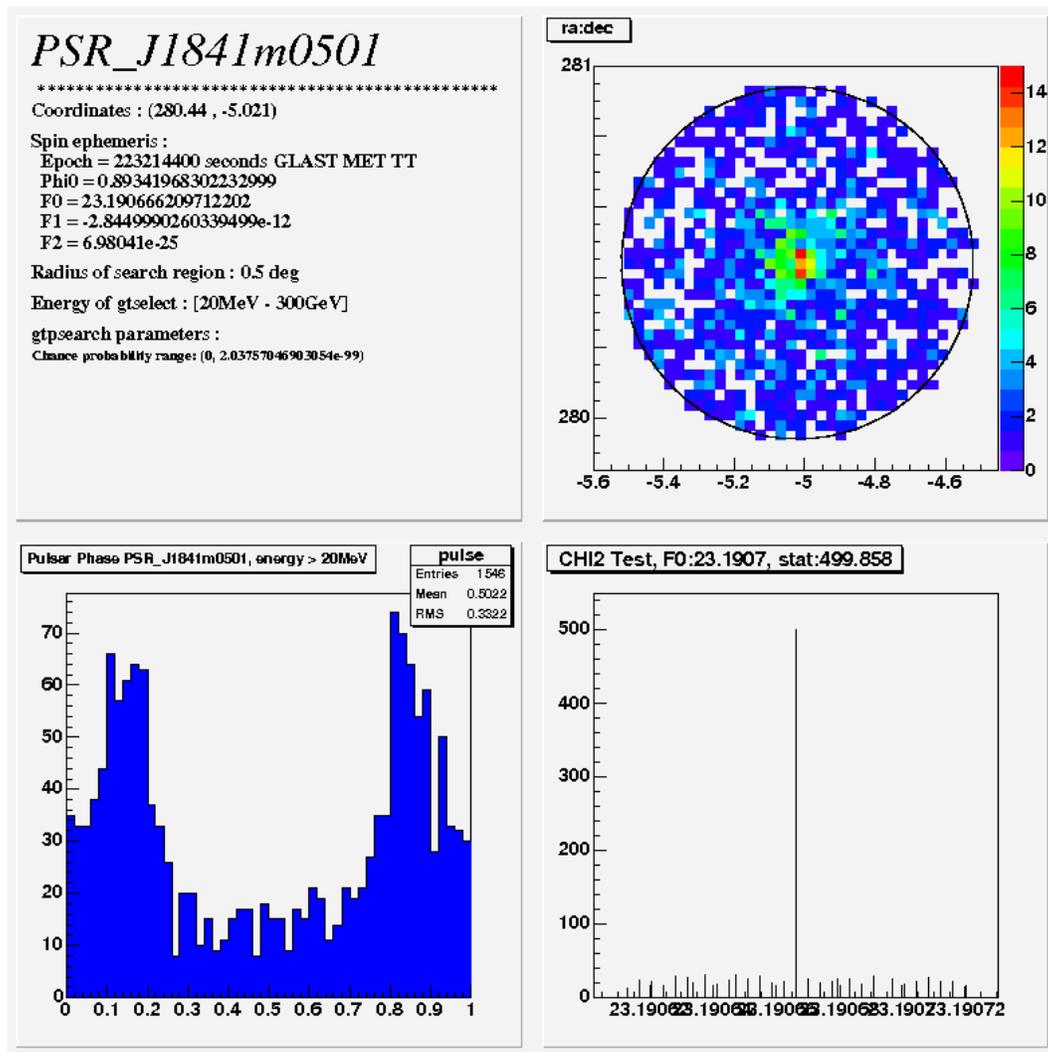


Figure 6: Extrait de la sortie de gtrtpulsar avec le pulsar PSR J1841m0501. En haut à gauche, on trouve les éphémérides du pulsar, en haut à droite la carte du ciel ciblée sur la source, en bas à gauche le phasogramme et en bas à droite la recherche de fréquence.

cela, une fenêtre présente le phasogramme du pulsar, couvrant une gamme d'énergie choisie, et enfin le résultat de l'outil gtpsearch.

3.5 Mise en évidence d'une pulsation

Expliqué précédemment, les courbes de lumière nous renseignent directement sur la présence d'une pulsation émise par une source. La mesure de la significativité de ces histogrammes nous indiquent quant à elle, la pertinence de la détection, en d'autres termes la confiance de la mesure. Une définition de la significativité est : $\sigma = \frac{\text{signal}}{\sqrt{\text{fond}}}$. Dans ce sens, à partir des résultats de **gtrtpulsar**, la significativité de chaque phasogramme associé aux pulsars peut être évaluée. On conclut à une détection, si la sensibilité calculée est égale ou supérieure à 5σ .

À cela, on rajoute le résultat de l'outil **gtpsearch**, affiché dans la 4^{ème} fenêtre de **gtrtpulsar**. Le ScienceTools utilise un algorithme de recherche de fréquence, de type transformée de Fourier rapide. Les paramètres **Chance probability range** et **Statistic test** (stat) nous

indiquent respectivement la probabilité de fluctuations du pic et la sensibilité par un test CHI2.

Autre méthode de détection : Pulsar Blind Search

D'autres méthodes de détection sont en cours d'élaboration. Notamment à l'Université de Californie de Santa Cruz, Marcus Ziegler travaille sur la recherche en fréquence de toutes les sources du catalogue LAT¹⁴. L'idée de base de son analyse est de calculer la transformée de Fourier de la différence de temps d'arrivée entre deux photons et ainsi de déterminer si la source pulse. L'enjeu de cette méthode est de détecter des pulsars qui n'émettent pas d'ondes radio, comme le pulsar **Geminga**, pulsar "Radio-quiet" (cf. table 2).

3.6 Analyse et résultats des données DC2

3.6.1 Recensement

Le choix d'utiliser les éphémérides radio, nous impose de travailler avec la base de données des éphémérides de DC2. Elle est composée de 98 pulsars, distribués dans le plan galactique et les nuages de Magellan, chacun simulé à partir du modèle slot gap. Parmi les sources, on note la présence des 6 pulsars d'EGRET.

Remarque : Le groupe d'astroparticules a choisi de détecter les pulsars émetteurs gamma à partir des contreparties radio (pulsars "Radio-loud") et, travaille actuellement sur les éphémérides radio de Nançay (cf. 3.2) qui remplaceront la base de données de DC2.

Le faisceau gamma du pulsar, dont l'émission est ponctuelle, est vu par le satellite comme une tâche. Cet aspect technique est lié à la Point Spread Fonction (PSF) de l'instrument, plus l'énergie du photon est haute, meilleure sera la localisation. En conséquence et ne connaissant pas le spectre en énergie du pulsar, pour trois coupures en énergie (20 MeV, 300 GeV, 1GeV) et deux coupures en rayon (0.5 degré, 1 degré), **gtprtpulsar** a analysé la base de données des éphémérides.

Nom du pulsar	0.5 °/20MeV	0.5 °/300MeV	0.5 °/1GeV	1 °/20MeV	1 °/1GeV	Détection
<i>PSR_B0531p21</i>	1	1	1	1	1	1
<i>PSR_B0833m45</i>	1	1	1	1	1	1
<i>PSR_J1741m2019</i>	1	1	0	1	1	1
<i>PSR_J1902p0615</i>	0	0	1	1	0	1
<i>PSR_J0709m2646</i>	0	0	0	0	0	0

Table 3: Extrait des résultats de **gtprtpulsar** pour différentes coupures en énergie et de rayon (indiquées en entête). 1 signifie qu'une pulsation a été mise en évidence, 0 dans le cas contraire, selon les critères explicités dans la section 3.5.

A partir des résultats obtenus par **gtprtpulsar**, j'ai répertorié (cf. table 3) les détections pour les différentes coupures. L'annotation utilisée est la suivante : 1 signifie qu'une pulsation a été mise en évidence, 0 dans le cas contraire, selon les critères explicités dans la section

¹⁴Ce catalogue répertorie toutes les sources gamma détectées par une recherche multi-échelle. Successeur du catalogue EGRET [5]

3.5. Les pulsars ayant moins de deux détections sont écartés, cela diminue fortement les fluctuations statistiques qui peuvent engendrer des erreurs. Au final, 44 pulsars gamma sur 98 ont été détectés (cf. figure 7), ainsi que 12 qui ont été observés qu’une seule fois.

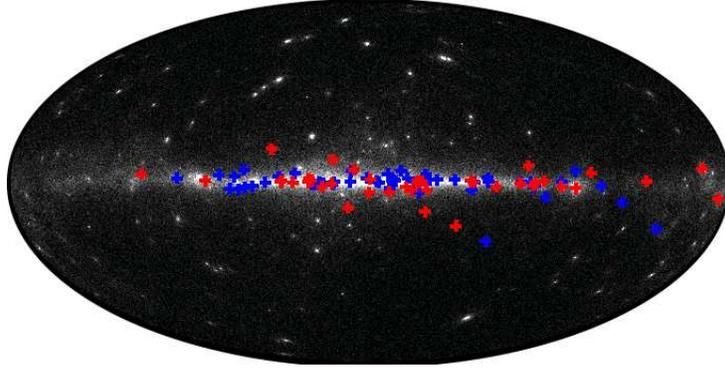


Figure 7: Distribution en coordonnées galactiques des 98 pulsars de la base de données de DC2. Les croix représentent la totalité des pulsars. Les croix rouges représentent les 44 pulsars de notre détection.

3.6.2 Localisation

Avec les résultats obtenus précédemment, j’ai évalué le recouvrement des coordonnées entre les 44 pulsars détectés et le catalogue du LAT, à l’aide du ScienceTools `gtsrcid`. Le résultat est l’identification de 27 pulsars avec une précision de 0,015 deg, soit 0,9 arcmin (cf. figure 8(2)). Les performances techniques de l’instrument annoncent une meilleure localisation. La différence est due à la durée de la simulation qui n’est que de 55 jours, et la répartition des pulsars qui se situent plutôt dans le plan galactique où le fond diffus est important. On remarque aussi qu’en ne tenant pas compte des sources, dont le test statistique du `gtpsearch` est inférieur à 200, la précision de la localisation obtenue passe à 0,005 deg soit 0,3 arcmin. Ainsi, en limitant le critère de sélection du `gtpsearch`, les sources sont mieux localisées.

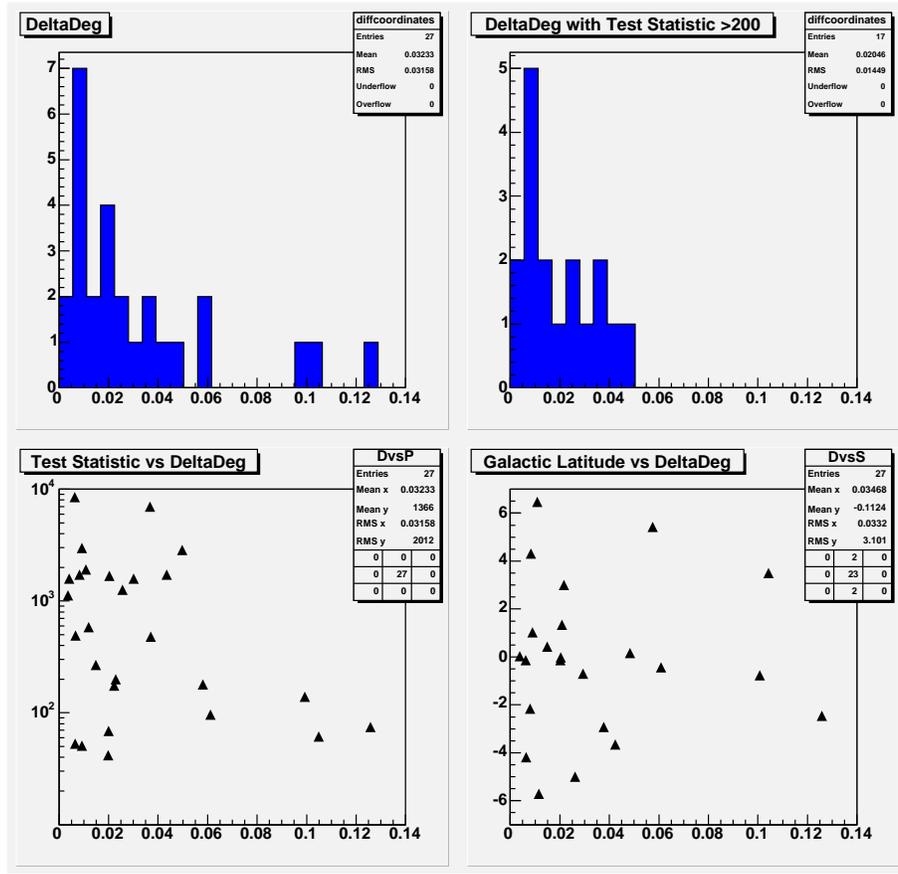


Figure 8: Résultat du recouvrement de nos 44 détections et du catalogue du LAT. 27 pulsars sont identifiés pour une probabilité supérieure à 70% sur les coordonnées. La précision sur la localisation est de 0,9 arcmin.

3.6.3 Sensibilité

La suite de l'analyse des détections s'oriente vers la sensibilité. En représentant le **test statistique** en fonction du flux gamma émis des 98 pulsars, il apparaît un seuil de détection autour de 25 (cf. figure 9). De plus, il existe une zone "grise" entre un flux de $5 \cdot 10^{-8} ph.cm^{-2}.s^{-1}$ et $5 \cdot 10^{-7} ph.cm^{-2}.s^{-1}$, où certains pulsars sont détectés et d'autres pas. L'existence de cette bande est certainement due au fond diffus du rayonnement gamma où se situe le pulsar.

Une deuxième analyse a été faite à l'aide du ScienceTools **gtobssim**. Le groupe d'astroparticules a simulé plusieurs pulsars similaires à PSR B1951p32 pendant une période d'un an, pour différents flux. La figure 10 représente la sensibilité de détection en fonction du flux du pulsar. Différents calculs de sensibilité ont été utilisés : le test CHI2, le test statistique du gtpsearch et la significativité définie en 3.5. On remarque que pour un an de simulation, le seuil critique de détection est passé à $3 \cdot 10^{-8} ph.cm^{-2}.s^{-1}$ en flux, soit un facteur de $\sqrt{\frac{365}{55}}$ en moins.

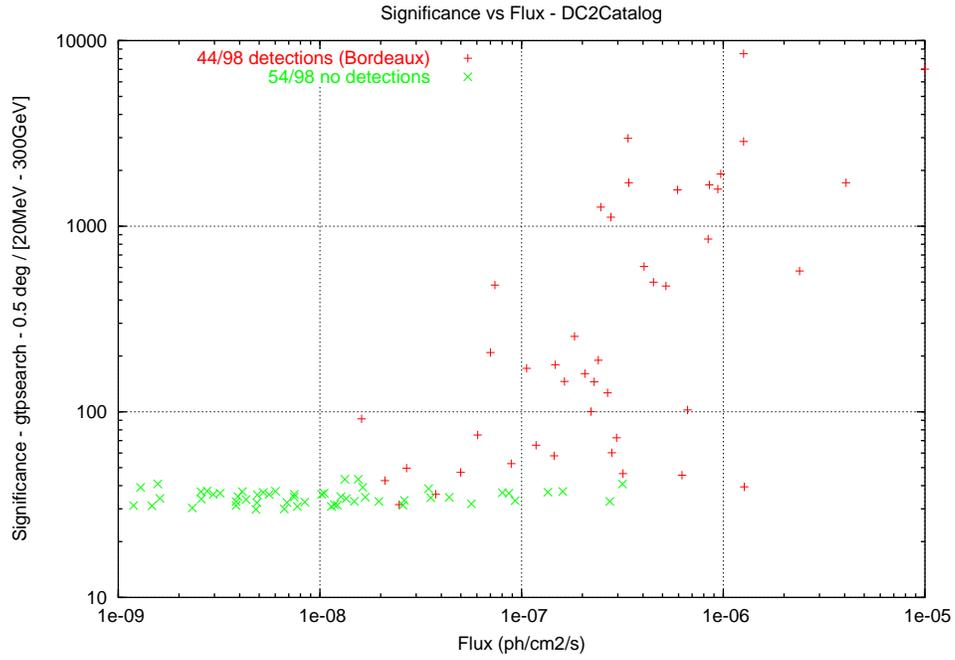


Figure 9: Sensibilité de l'outil gtpsearch en fonction du flux gamma, pour des photons allant de 20 MeV à 300GeV, des 98 pulsars de la base de données des éphémérides DC2.

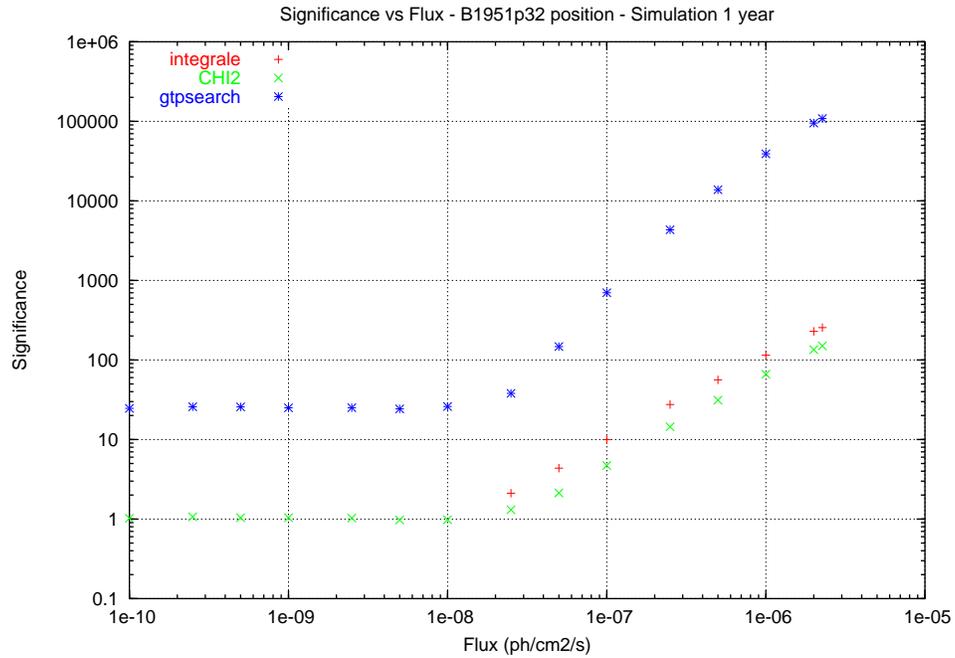


Figure 10: Sensibilité de détection en fonction du flux du pulsar, pour une simulation d'un an.

3.6.4 Closeout

Après 3 mois de préparation avec DC2, la population de pulsars émetteurs gamma a été dévoilée. Sur les 98 de la base de données des éphémérides, 64 avait un flux gamma

suffisamment fort pour être aperçu par GLAST. Malgré cela, les résultats obtenus avec ma méthode de détection semblent encourageants.

Conclusion et perspectives

Les pulsars sont de véritables laboratoires, regroupant à eux seuls, plusieurs domaines de la physique, comme la physique subatomique, la physique des plasmas, la relativité générale et l'astronomie des hautes énergies. Notamment, le système binaire PSR B1913+16 a permis de confirmer l'existence des ondes gravitationnelles prédites par la théorie de la relativité générale d'Einstein. Les pulsars sont donc un objectif majeur dans la recherche actuelle, autant pour vérifier les théories, que pour comprendre notre univers. De par la technologie du satellite, l'expérience GLAST sera une phase majeure dans l'histoire de l'astronomie gamma et des pulsars.

Pendant ce stage, j'ai participé à une étape importante dans la préparation de l'expérience GLAST : le Data Challenge 2. Il m'a permis de prendre part dans cette grande expérience d'astrophysique et de connaître la joie de la découverte de pulsars gamma, même devant une simulation. Même si les critères de détection demandent à être perfectionnés, la recherche des pulsars gamma à partir des éphémérides radio, a été concluante et enrichissante.

Mes perspectives

- Quantifier le seuil de détection et de sensibilité.
- Additionner le ScienceTools **gtlikelihood** à mon analyse automatique **gtrtpulsar**, afin de mesurer le flux.
- Maîtriser les éphémérides radio en traitant les données brutes de Nançay avec le logiciel Tempo, dans le but de maximiser la significativité de la pulsation sans augmenter le nombre d'essais.
- Identifier et développer une connaissance profonde de 10 à 20 pulsars forts candidats au rayonnement gamma. Simuler leur spectre, prédire les résultats, pour éventuellement définir leur modèle théorique ("polar cap", "outer gap") et la géométrie du faisceau, sujets rencontrés dans ce stage.

Remerciements

Je tiens à remercier avant tout D.A. Smith, pour m'avoir réellement fait confiance et laissé une chance pour ce stage. Je remercie également, D. Dumora et T. Reposeur et M. Grondin pour tous leurs conseils et P. Quentin et M. Dobrijevic, les responsables du Master APC.

Bibliographie

- [1] Lyne, A.G., and Graham-Smith, F., Pulsar Astronomy, Second edition, Cambridge Astrophysics Series 31 (1998)
- [2] Durand, E., Recherche de photons pulsés au-dessus de 30 GeV dans le Crabe et PSR B1951+32 avec le détecteur Cerenkov atmosphérique Céleste.
- [3] Fierro, J. M., Observations of Spin-Powered Pulsars with The EGRET Gamma Ray Telescope, Stanford University (1995)
- [4] Hagiwara, K. et al., Physical Review D66, Particle Data Booklet (2002)
- [5] Hartman R. C. et al., "The Third EGRET Catalog of High-Energy Gamma-Ray Sources", The Astrophysical Journal Supplement Series, n°123, pp.79-202 (1999)
- [6] Weber, F., Neutron star interiors and the equation of state of superdense matter.
- [7] Gourgoulhon, E., Objets Compacts, Cours du Master Sciences de l'Univers et Technologies Spatiales, Université Paris VI, Paris VII et Paris XI (2004-2005)
- [8] Grondin, MH., Préparation de la science avec le satellite GLAST : L'étude des pulsars, Université Bordeaux 1 (2006).
- [9] Silk, J., Ed. Odile Jacob, Une brève histoire de l'univers.
- [10] <https://confluence.slac.stanford.edu/display/DC2/2006/04/24/Automatic+phase+analysis+of+pulsars>
- [11] <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>, Australia Telescope National Facility, ATNF Pulsar Catalogue.
- [12] Harding, A. K., Muslimov A. G., "Pulsar Polar Cap Heating and Surface Thermal X-Ray Emission. II. Inverse Compton Radiation Pair Fronts", The Astrophysical Journal n°568, pp. 862-877 (2002)
- [13] Harding. A. K., Muslimov A. G., Zhang B., "Regimes of Pulsar Pair Formation and Particles Energetics", ApJ 576 (2002) 366-375.