

Détection de Pulsars @ 21cm

Jean-Jacques MAINTOUX - F1EHN

PULSAR : « PULSATING STAR »

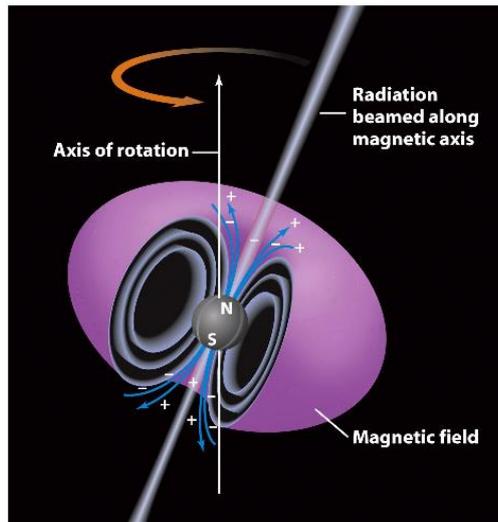


Table des matières

1	Signaux recherchés et choix techniques :	2
1.1	Evaluation : Premier essai de réception	2
1.2	Effet de scintillation.....	3
1.3	Effet de dispersion.....	3
2	Modifications du RT 21cm.....	3
2.1	Chaîne de réception	3
2.2	Traitement et détection :	5
3	Pulsar@home (simulation d'un pulsar).....	6
3.1	Test de la partie RF/FI.....	6
3.2	Test de la détection	6
3.3	Test du traitement.....	7
4	Premier test sur RT 21cm	9
4.1	Précision d'horloge d'échantillonnage	9
4.2	Effet Doppler	9
5	Observation de B0329+54 – Pulsar n°1	10
6	Observation de B0950+08 – Pulsar n°2	13
7	Observation de B1133+16 – Pulsar n°3	15
8	Observation de B2020+28 – Pulsar n°4	19
8.1	Evolution du radiotélescope.....	19
8.2	Détection de B2020+28	20
9	Conclusions – Prochaines évolutions	23

1 Signaux recherchés et choix techniques :

Les différents pulsars recensés par la communauté scientifique sont listés dans différentes bases de données. J'ai utilisé celle de l'ATNF <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/> ainsi que le très documenté et détaillé site web Neutron-Star Group <http://neutronstar.joataman.net/> dédié à l'observation amateur de ces objets. Ce site comporte également des outils pour aider les amateurs dans cette aventure... et ceci en est une que je vais essayer de détailler dans les lignes qui suivent.

Pour débiter, il est bon de rappeler ce qu'est un Pulsar.

« Un pulsar (de « pulsating star ») est un objet astronomique produisant un signal périodique allant de l'ordre de la milliseconde à quelques dizaines de secondes. Ce serait une étoile à neutrons tournant très rapidement sur elle-même (période typique de l'ordre de la seconde, voire beaucoup moins pour les pulsars milliseconde) et émettant un fort rayonnement électromagnétique dans la direction de son axe magnétique. »

Retrouvez la suite de ce texte ici : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pulsar>

Les pulsars rayonnent des ondes électromagnétiques dans différent domaine et nous nous intéressons bien sûr ici au domaine radio et plus particulièrement au 21cm, bande de mon radiotélescope (RT) ci-dessous.



Figure 1 : Antenne 3.3m utilisée pour l'observation des pulsars

Si je devais construire une antenne, je pense que les bandes plus basses (UHF – 400 MHz) sont mieux adaptées car plus faciles à mettre en œuvre et la plupart des pulsars y présentent un pic de flux.

1.1 Evaluation : Premier essai de réception

Pour le 1^{er} essai, le choix se porte évidemment sur l'observation du pulsar le plus puissant de l'hémisphère Nord. Il porte le nom de B0329+54 (ces chiffres donnent un aperçu de ses coordonnées RA ~ 3 heures 29 minutes, DEC ~ +54 degrés).

Je ne veux pas réécrire l'excellent travail déjà effectué par Steve OLNEY – VK2XV, vous trouverez toute la démarche autour de B0329+54 sur cette page :

http://neutronstar.joataman.net/technical/amateur_challenges.html

Pour l'obtenir en Français, utiliser cette adresse dans Bing translator <http://www.bing.com/translator/>

D'après les principales caractéristiques de B0329+54, Flux moyen $S_{1400} = 203$ mJy, largeur de pulse à mi-puissance $W_{50} = 6.6$ ms et Période de rotation $P_0 = 0.714520$ sec, le temps d'observation calculé d'après la formule du radiomètre pour mon RT est de l'ordre de 2 heures avec 2 MHz de bande utile.

Le 1^{er} essai s'est donc déroulé avec le RT 21cm non modifié. Cet essai a été négatif à 2 reprises. Après recherche, il semble que la principale cause est l'effet de scintillation très marqué pour ce pulsar.

1.2 Effet de scintillation

J'ai ainsi appris qu'une caractéristique très importante des pulsars est la scintillation. Cet effet est dû à des interférences destructives et constructives affectant les signaux traversant le milieu interstellaire ainsi que l'atmosphère. Si ces interférences peuvent être vos amis, pour une petite antenne elles sont surtout signe d'absence de signaux ou signaux faibles conduisant à résultat négatif.

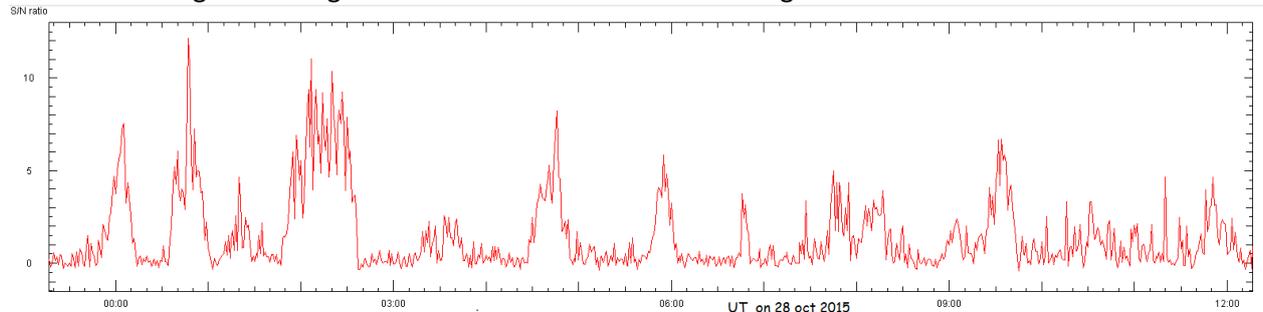


Figure 2: Scintillation B0329+54 - Mesure DLOSHF

L'image ci-dessus (mesures effectuées par DLOSHF - <http://sat-sh.lernnetz.de/pulsarsE.html>) montre l'impact de la scintillation sur l'amplitude du signal de B0329+54. On comprend alors que la détection pour une petite antenne tient de la chance.

Pour avoir le maximum de chance de détecter B0329+54, il faut donc augmenter la sensibilité du RT pour réduire le temps d'observation. Le seul facteur modifiable sans reconstruire le RT est sa bande passante. La limite de bande est amenée par le récepteur mais également par une autre caractéristique importante des pulsars : la dispersion.

1.3 Effet de dispersion

Lors de son trajet, le spectre large bande du signal émis par le pulsar est affecté par la densité électronique du milieu interstellaire. Les fréquences plus basses sont retardées par rapport aux fréquences plus élevées, ce qui se traduit, sans précaution à un étalement temporel du pulse et donc à une perte de signal. Attention cet effet est encore plus impactant sur les bandes plus basses.

La mesure de dispersion DM est de $26.76 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$ (pc = parsec) pour B0329+54. A l'aide du calculateur de dispersion http://neutronstar.ioataman.net/technical/disp_del_calc.html , en se fixant une dispersion de l'ordre de $W50/2$ soit 3.5 ms, on calcule que la bande de fréquence peut être portée à 50 MHz.

Avec une bande 25 fois plus large, alors le temps d'observation pour détecter B0329+54 est 25 fois plus faible soit de l'ordre de 5mn ($\text{sqr}(Bw * \text{Tau}) = \text{constante}$).

La durée d'enregistrement restera inchangée car il faut « déjouer » la scintillation et donc profiter des instants favorables qui devraient permettre une détection plus rapide.

Par contre, le passage à 50 MHz n'est pas sans impact sur l'architecture du RT.

2 Modifications du RT 21cm

2.1 Chaîne de réception

La fréquence intermédiaire est modifiée pour passer à 50 MHz de bande. Sa fréquence centrale et ses filtres FI sont remplacés pour couvrir 15 à 65 MHz soit une FI centrale de 40 MHz. L'oscillateur local est également adapté à la nouvelle FI pour transposer la bande RF de 1427 +/-25MHz. Le Front end RF n'est pas impacté (la bande des filtres 21cm est de 50 MHz). La réjection Image RF reste correcte.

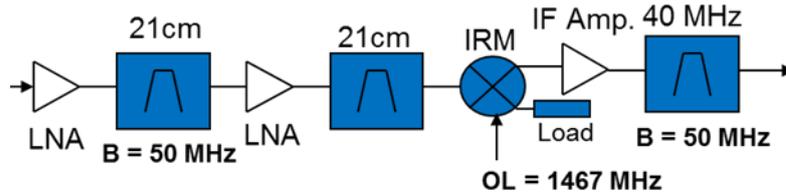


Figure 3: Chaîne de réception

Avec 50 MHz, il est difficile au niveau amateur de rester sur un récepteur numérique SDR. Le choix est donc de recourir à une détection large bande classique adaptée aux pulsars. Afin d'éviter des synchronisations complexes pour synchroniser la détection sur la période du pulsar, cette tâche est dédiée au traitement numérique (voir plus bas).

La solution est donc inspirée de la chaîne de réception utilisée par DL0SHF mais le milliwattmètre est remplacé par un détecteur RF à réponse quadratique (square law detector) type HP8472A suivi d'un intégrateur RC de l'ordre de 1ms.

Le signal est ensuite amplifié par un amplificateur opérationnel type AD826. Enfin le signal est numérisé par un ADC 16 bit réalisé à l'aide d'un Teensy 3.2 (Arduino like). J'ai utilisé un applicatif « Oscilloscope » adapté à ce module et piloté par Matlab décrit ici : <http://www.mccausercontent.sc.edu/crnl/oscilloscope>



Figure 4 : Module numérisation 16 bits

Les différentes modifications décrites ci-dessus conduisent donc à l'architecture suivante montrée par le synoptique ci-dessous.

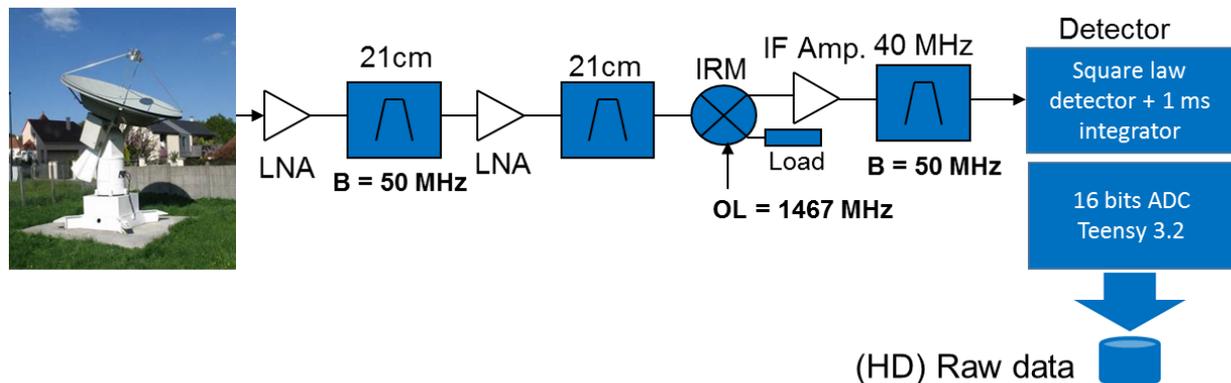


Figure 5: Architecture du récepteur pulsar

Les données sont échantillonnées à 1 kHz (ou 1ms) et sont stockées sur disque pour effectuer un traitement en temps différé.

Le traitement assure également la synchronisation temporelle à la période du pulsar pour effectuer une détection synchrone.

La caractéristique critique du récepteur est la stabilité et la précision de cette horloge à 1ms. Une stabilité de $2.E-7$ ($<1.5ms$ sur 2h) est requise pour conserver une parfaite synchronisation sur la durée de l'enregistrement. La précision permet de restituer la période du pulsar la plus précise possible.

2.2 Traitement et détection :

Les données sont une suite d'échantillons 16 bits cadencés à 1ms. Le traitement est donc relativement simple à effectuer. Il pourrait être effectué à l'aide d'Excel, Octave, Scilab, Python.... J'ai choisi Matlab par habitude et pour ses sorties graphiques.

Le principe de traitement permettant la détection est présenté par le graphique ci-dessous.

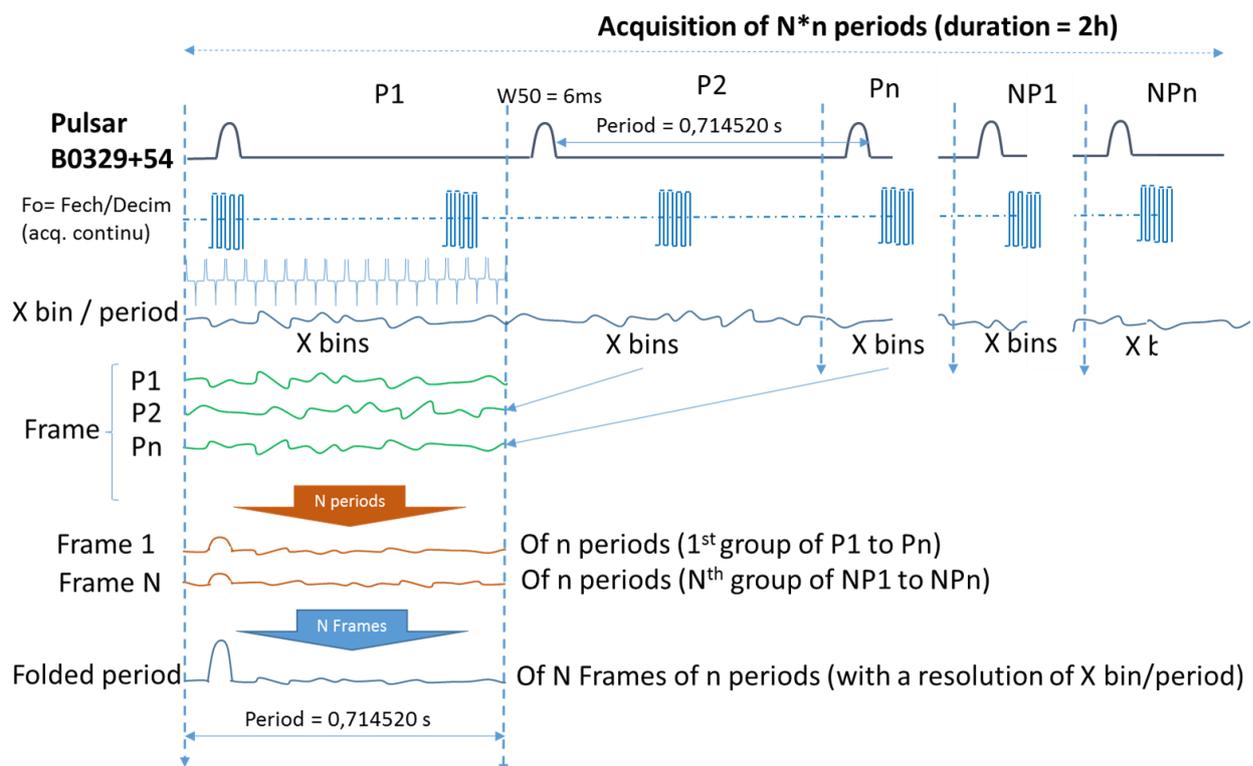


Figure 6: Synoptique détaillé du traitement

Il permet de présenter les données de 2 manières :

- Suivant une vue tramée constituée de différentes trames (ou frame). Cette vue montre l'évolution du signal en fonction du temps.
- Suivant une vue globale de la période repliée. Alors on peut évaluer l'aspect temporel du signal du pulsar.

Les paramètres de X bin/period, durée de chaque frame et nombre pulses repliés sont choisis suivant les détails que l'on souhaite révéler (et suivant le SNR du pulsar observé). Ces astuces pour améliorer les fonctionnalités du traitement m'ont été suggérées par Joachim Köppen DF3GJ de l'équipe DLOSHF. De nombreux échanges m'ont permis également de bénéficier de sa grande expérience (voir son site).

Important : Seuls les pulsars connus et les plus puissants sont détectables par des moyens d'amateur (antenne de quelques mètres) en mettant en œuvre cette détection synchrone basée sur la connaissance scientifique des paramètres du pulsar.

3 Pulsar@home (simulation d'un pulsar)

Suite à ces 2 premiers tests négatifs, un banc de mesure dédié « Pulsar » est construit pour essai sur table avant mise en service dans le RT.

Ce banc doit permettre de tester la partie RF modifiée, la détection et le traitement.

3.1 Test de la partie RF/FI

C'est la plus facile à tester en mettant en œuvre un sweep 1.4 / 1.5 GHz et en relevant le transfert de la chaîne avec un analyseur de spectre.

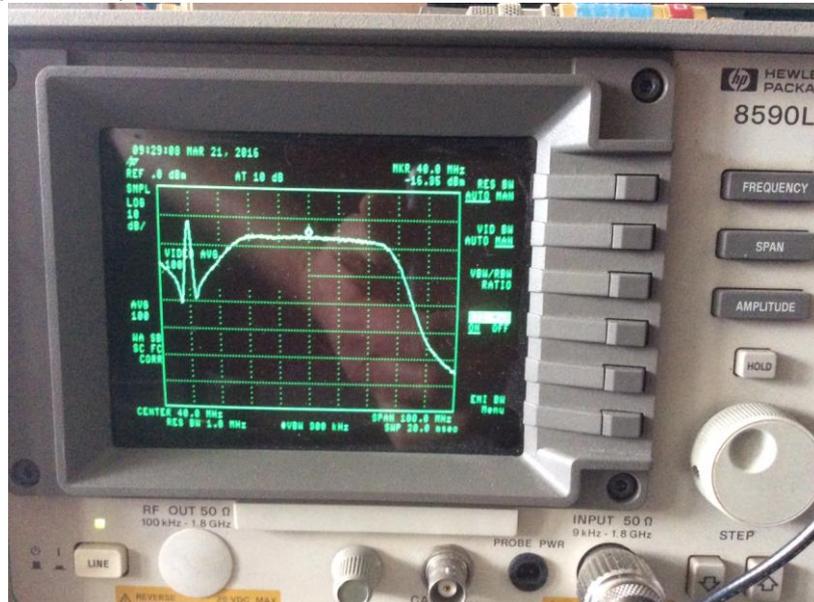


Figure 7: Mesure du signal FI (Bw=50MHz)

Le résultat est nominal et les réjections hors-bande sont correctes. La réponse est plate et le gain permet une détection correcte.

3.2 Test de la détection

Pour tester cette détection, le banc ci-dessous est réalisé à l'aide d'une diode de bruit pulsée suivie d'un atténuateur variable de 0 à 40 dB de manière à simuler le signal d'un pulsar, premièrement à fort niveau pour tester la détection et l'intégration, et deuxièmement à faible niveau pour simuler le pulsar et valider le traitement.

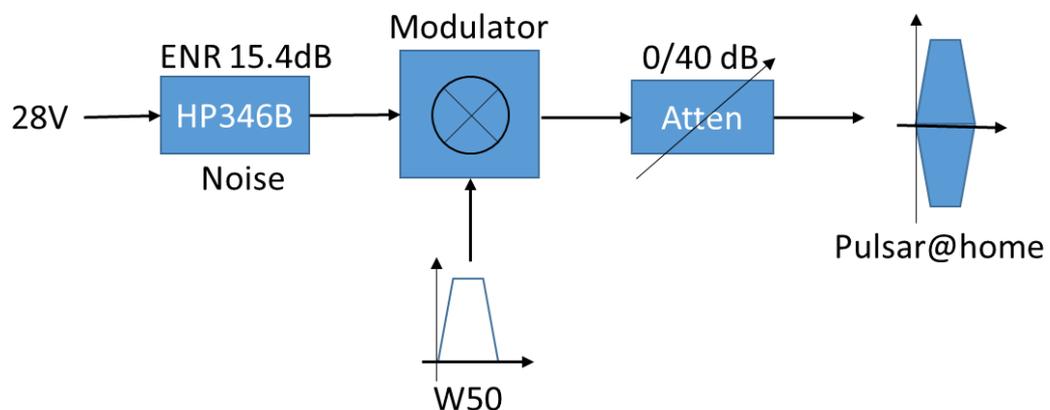


Figure 8: Banc RF pulsé

Le récepteur est alors testé sur table (ci-dessous, platine récepteur sur la gauche, le module FI et détecteur au centre, l'OL en bas (le récepteur intègre un multiplicateur d'OL par 12). La détection peut alors être testée à l'aide d'un oscilloscope pour vérifier la qualité de détection ainsi que la constante d'intégration. Le signal détecté est ajusté avec un offset de 1.6V pour être numérisé via l'ADC 16bit alimenté en 3.3V.

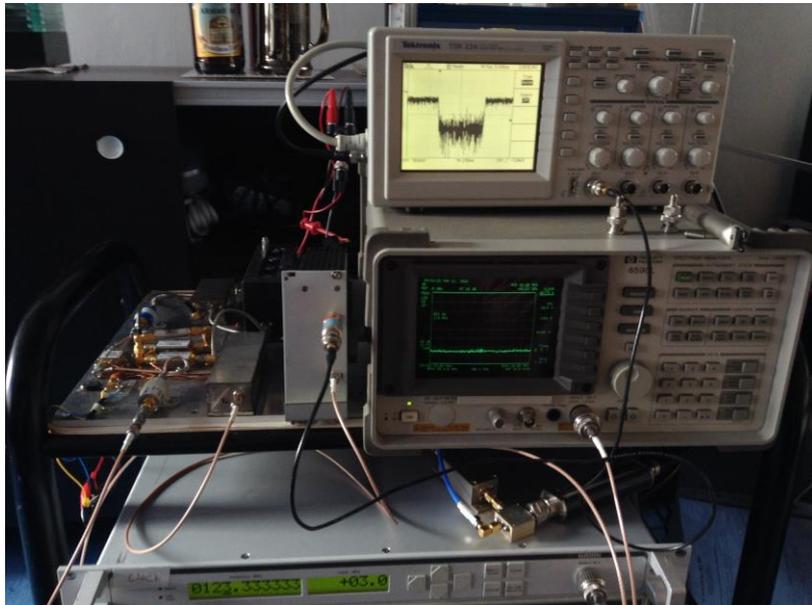


Figure 9: Essai de détection sur PSR simulé

L'ensemble de la chaîne est testé d'un point de vue analogique à l'aide de signaux adaptés.

3.3 Test du traitement

Le calcul ci-dessous permet de définir le paramétrage du générateur de pulse pour simuler un signal réel afin de tester la chaîne complète avec le traitement de signal.

Pour le PSR B0329+54, la température d'antenne attendue est de 0.038K pour une température système T_{Sys} de 65K soit un ratio de $58.4E-05$. En labo, $T_0 = 290K$ et $T_{\text{sys}} = 350 K$, il faut donc simuler un signal (ratio* T_{sys}) de 0.204K soit 290.2K ou un ENR de -32.3dB.

Period P= 0,715 s
 Pulse @ 50% W50= 0,006 s
 Peak flux Sc= (P / W50) flux moyen

Freq MHz	Flux (Jy)	
	Average	Peak
1400	0,20	24

Bw = 50 MHz

Signal level

Antenna	Effective area	4,4 m ²	
Tantenna		0,038 K	5,2397E-24 W/Hz
Trec		60 K	-202,81 dBm/Hz
Tsky		5 K	-125,82 dBm
Tsys		65 K	8,97E-21 W/Hz
	ratio Ta/Tsys	0,000584132	-170,47 dBm/Hz
			-93,48 dBm

Pulsar@Home

Tsys	To + Trec	350 K	4,83E-20 W/Hz
Tant	Simu pulsar	0,204 K	-163,16 dBm/Hz
			-86,17 dBm
	ENR	-32,33 dB	290,2 K

La simulation du pulsar est effective en atténuant l'ENR de 15.4 dB pour le ramener à -32.3 dB soit une atténuation totale de 47.7 dB. Le banc présentant env 8dB de pertes (modulateur + isolateur + câble), le test est donc effectué avec un atténuateur de 40 dB.

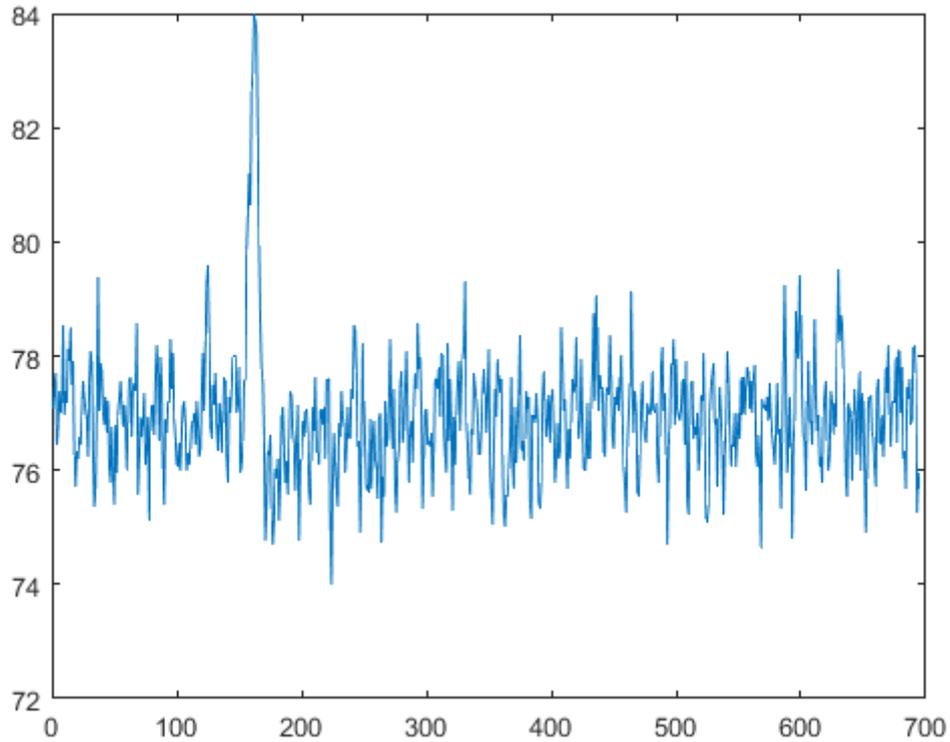


Figure 10: Détection Pulsar@home

Après traitement, le résultat est très proche de l'attendu en visualisant les données avec 600bin/period.

4 Premier test sur RT 21cm

Un enregistrement d'env 2h est effectué en poursuite sur B0329+54 le 3 Avril 2016. La figure ci-dessous montre le signal de B0329+54 avec, en Y, le temps suivant 140 frames de 2mn et en X, la période simulée du pulsar d'après le calcul Tempo.

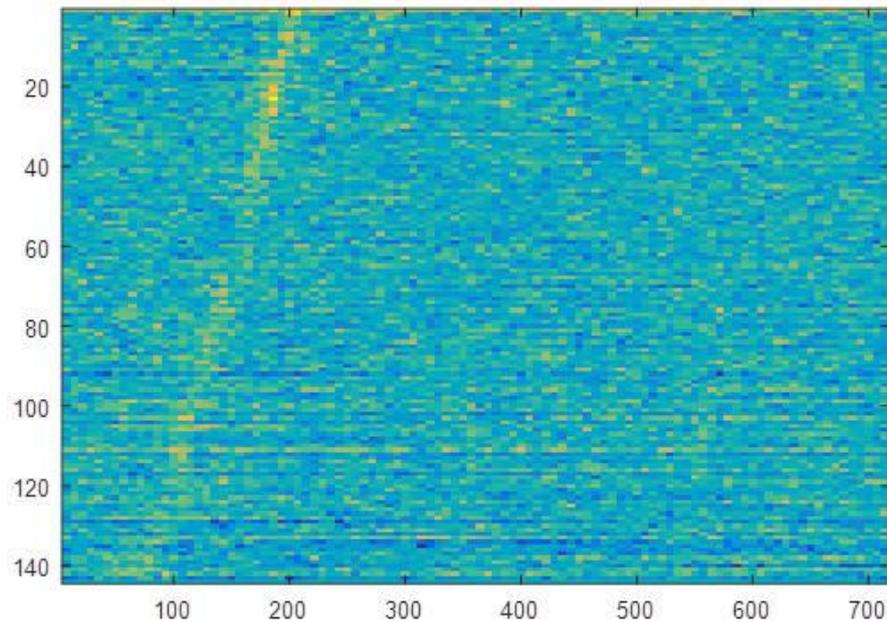


Figure 11: Première détection de B0329+57

Malgré un réglage imparfait de la période du Pulsar, on constate que la détection est évidente. Ce mauvais réglage se traduit par une dérive temporelle au fur et à mesure de l'enregistrement par rapport à la période de référence. Cette observation amène 2 commentaires très importants.

4.1 Précision d'horloge d'échantillonnage

Cette caractéristique a déjà été discuté ci-dessus. En plus de la stabilité, l'horloge d'échantillonnage doit être précise car elle est la référence pour le repliement des différents échantillons. Si l'horloge est décalée, au fur et à mesure du temps, les échantillons sont affectés à la mauvaise case (phase) de la période du pulsar. Alors on observe ce décalage. Ce n'est pas gênant pour un signal correct mais ça le deviendrait pour un signal plus faible (le gain de traitement sur la totalité des échantillons ne serait pas accessible à cause de cet étalement temporel).

Par rapport à la période attendue, on constate que la fréquence d'échantillonnage est décalée de $2E-05$. Cette erreur est due à la précision de l'oscillateur du Teensy 3.2. Ce coefficient sera utilisé dans les prochaines observations pour corriger les périodes observées.

4.2 Effet Doppler

Cet effet n'est pas important concernant le signal du pulsar car son spectre est à très large bande et aucun traitement Doppler n'est effectué.

Par contre cet effet a un impact important sur la période observée du pulsar. Parce que les précisions recherchées sont importantes, le décalage Doppler apporté par l'effet Doppler n'est pas du tout négligeable. Des logiciels tels que Tempo, Presto (s'appuyant sur Tempo) permettent de calculer la période observée en prenant en compte toutes les composantes Doppler, de la vitesse relative du pulsar à la rotation terrestre. C'est Wolfgang Hermann du RT Astropeiler de Stockert en Allemagne qui m'a prédit toutes les périodes pour mes différentes observations.

5 Observation de B0329+54 - Pulsar n°1

Un 2^{ème} essai effectué le 24 Avril conduit à 1 résultat positif très similaire au premier. Désormais le RT est fonctionnel et cet essai est détaillé dans ce chapitre. La figure ci-dessous montre l'évolution du signal du pulsar en fonction du temps. Le waterfall montre 75 trames de 2mn (120sec).

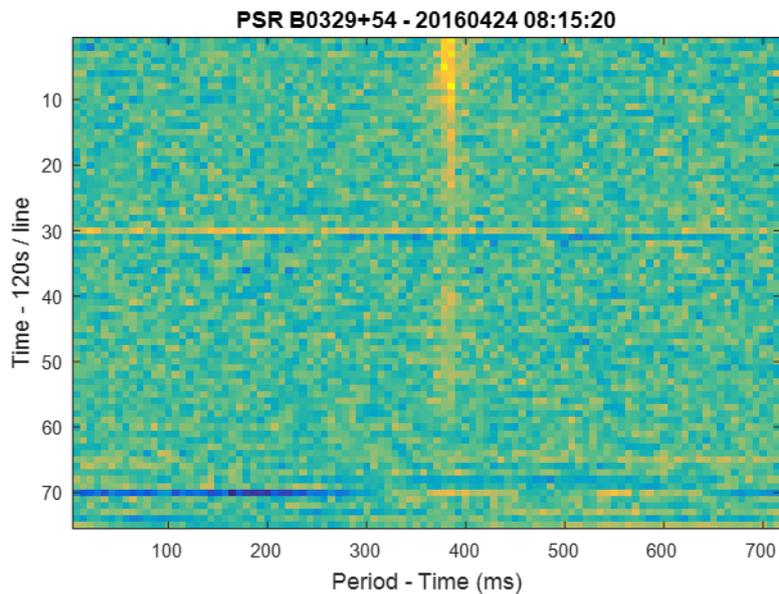


Figure 12: Détection de B0327+54 en fonction du temps

On constate que l'écart d'horloge est corrigé. L'observation est parfaitement synchronisée sur la période topocentrique du pulsar. L'effet de scintillation est marqué de la même manière que pour l'enregistrement précédent, révélant un signal assez « puissant » sur les 15 premières trames (env 30min) puis un signal faible sur les 10 trames suivantes et ensuite une extinction sur les 15 trames suivantes de 25 à 40. Le reste de l'enregistrement reste à un niveau faible mais il faut voir qu'ici le temps d'observation est de 2 min par trame. Le bilan prévoit 5 min avec 50 MHz de bande ce qui montre un fonctionnement et un résultat très proche de l'attendu.

Si l'on replie la globalité des échantillons sur une période, alors le S/B (SNR) est très favorable comme le montre la figure ci-dessous avec une résolution de 100 bin/period.

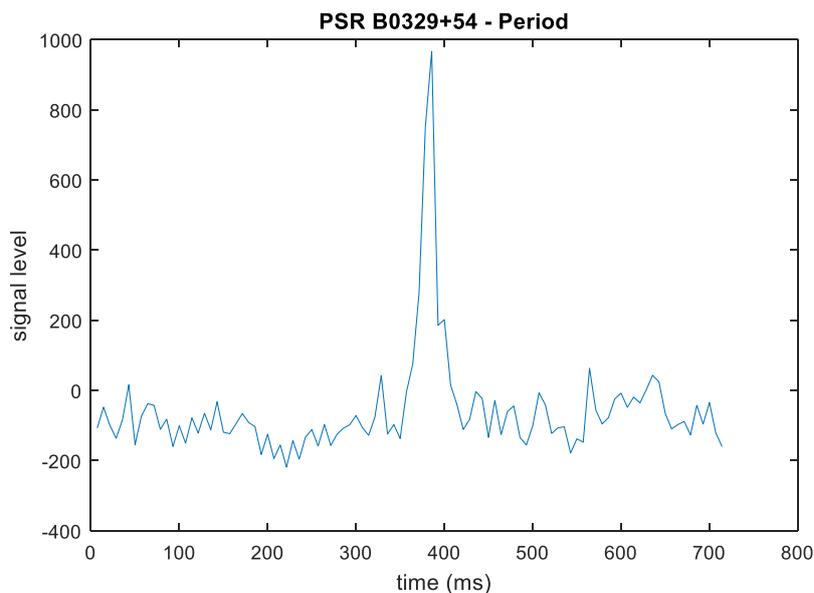


Figure 13: Un seul pulse intégré - 100 bin/période

Avec un tel signal, il est alors possible de modifier les paramètres de traitement en passant de 100 bin/période à 700 bin/période afin d'améliorer la résolution temporelle et d'affiner les détails.

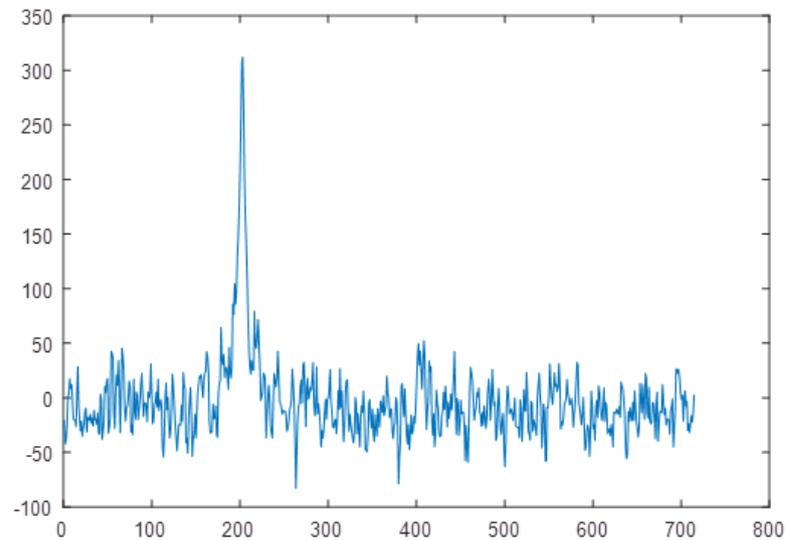


Figure 14: Un seul pulse intégré - 700bin/période

Ce nouveau graphique révèle alors la présence d'un pré et d'un post pulse au pied du pulse principal. Cette caractéristique de ce pulsar est connue. Ici, la vue correspond au mode normal où le post-pulse est supérieur au pré-pulse. Il représente 80 % du signal. Les 20% restant n'ont pas pu être observés.

D'après les experts, la présence de pré et post-pulses révèle des modifications dans la composition chimique et dans la structure de surface du pulsar. Voir <http://adsabs.harvard.edu/abs/1982ApJ...258..776B>

Avec ce SNR toujours correct, il est alors possible de tracer la succession de plusieurs pulses. La figure ci-dessous montre la bonne stabilité du mode normal observé. Les pré et post-pulses sont parfaitement visibles.

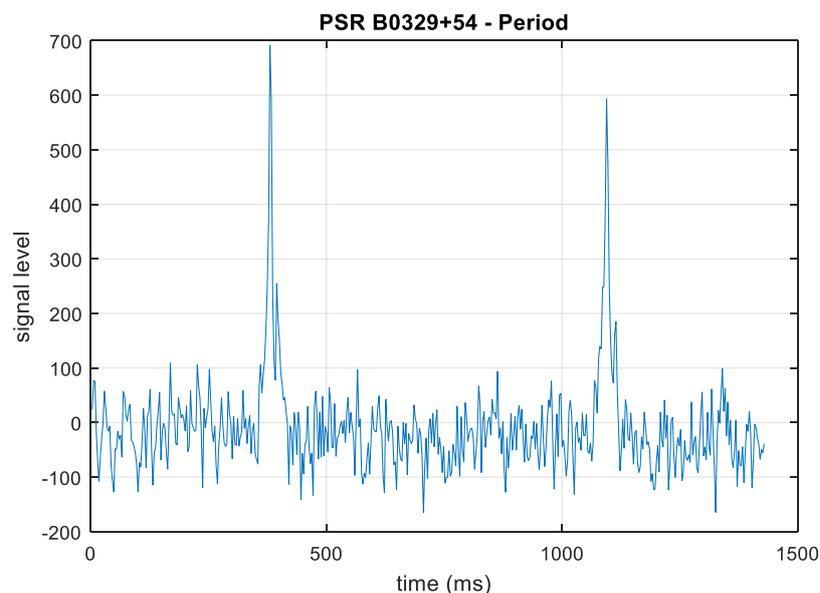


Figure 15: 2 pulses intégrés - 700bin/période

Pour le fun, j'ai donc analysé une séquence de plusieurs pulses afin d'utiliser l'enveloppe de détection pour moduler un bruit synthétique afin de recréer un signal audio représentant la réception du pulsar. Le fichier est ici : https://www.youtube.com/watch?v=WbHWxLmAy4k&feature=em-share_video_user

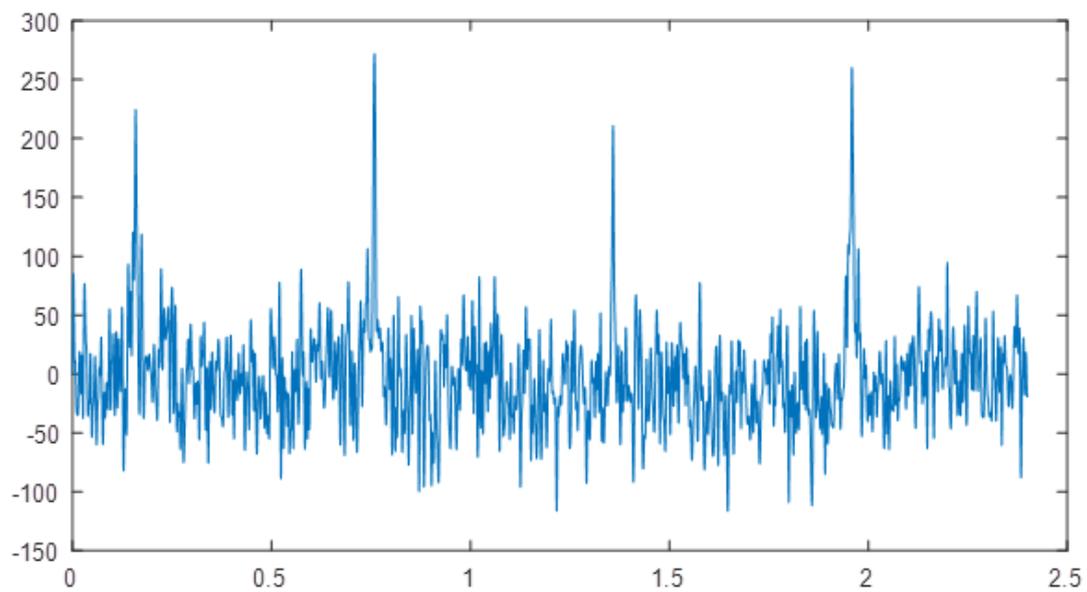


Figure 16: 4 pulses intégrés - modulation audio

Le changement du détail des pulses sur cette séquence pourrait laisser croire à un changement de mode mais le rapport signal à bruit n'est pas suffisant pour conclure.

6 Observation de B0950+08 – Pulsar n°2

Ce pulsar est le 2^{ème} plus puissant de l'hémisphère Nord. Ses principales caractéristiques sont : Flux moyen S1400 = 84 mJy, largeur de pulse à mi-puissance W50 = 9.5 ms et Période de rotation P0 = 0.253065 sec.

La dispersion de B0950+08 est très faible et donc négligeable dans cet essai par rapport à la largeur du pulse.

La figure ci-dessous montre l'évolution du signal de B0950+08 en fonction du temps. L'axe X correspond à la période du pulsar, et l'axe Y correspond à la durée d'enregistrement de 3h (180 min) découpée en 9 trames de 1200 sec (20 min). La trame 7 révèle une période de signal exploitable due à un problème technique sur le système de poursuite du RT.

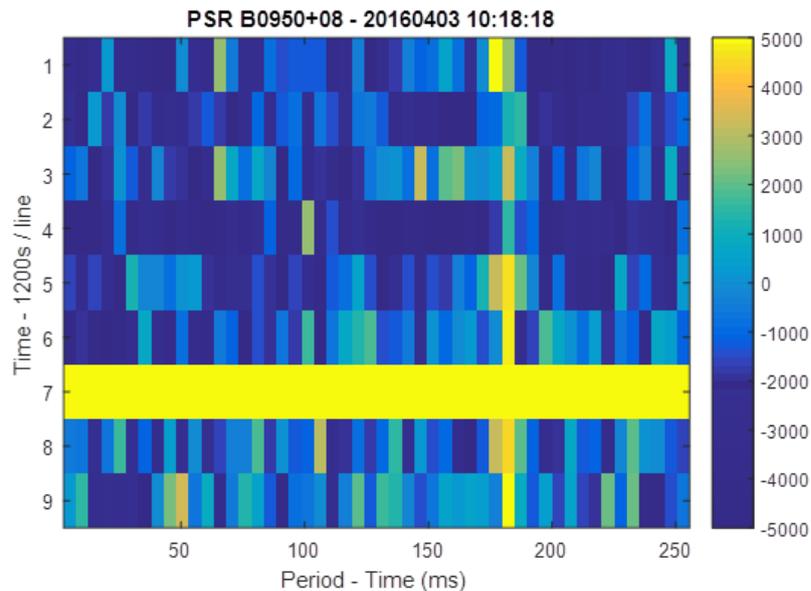


Figure 17: Waterfall 9 frames de 20 mn

La période mesurée (obtenue en recherchant le maximum de rapport signal à bruit – max SNR) est de 253.0739 ms. Après correction de l'erreur d'échantillonnage de 2^E-5 , la période pulsar mesurée est donc de 253.0789 ms soit très proche du calcul Presto, à savoir 253.07884 ms.

On peut constater également que le signal est plus stable sur la durée de l'enregistrement. La scintillation de ce pulsar est plus faible, probablement dû à une distance plus faible d'environ 850 AL (contre 3460 AL pour B0329+54) d'après un commentaire de Wolfgang.

La figure ci-dessous montre la période du pulsar repliée sur la totalité de l'enregistrement avec une résolution de 50 bin/period.

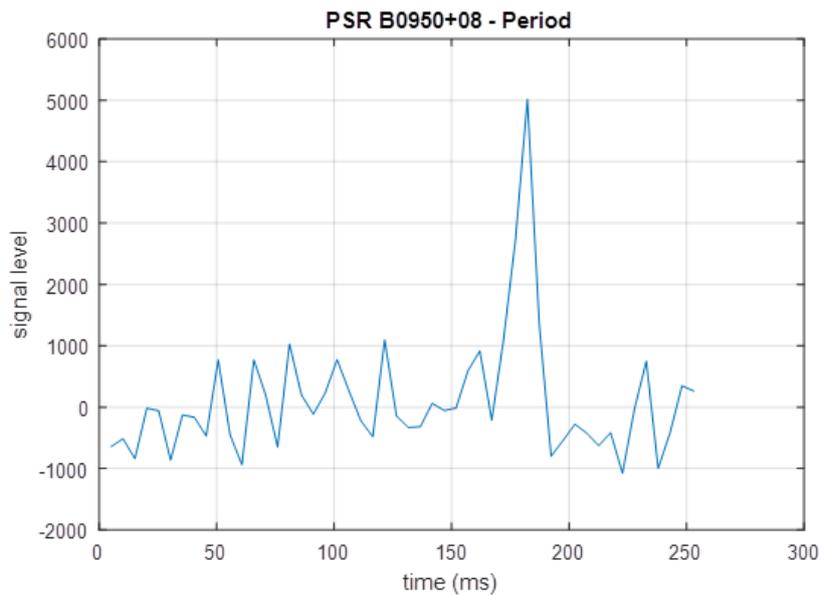


Figure 18: B0950+08 - 1 pulse intégré - 50bin/période

Le SNR obtenu permet d'améliorer la résolution et la figure ci-dessous montre la même période avec une résolution de 500 bin/period.

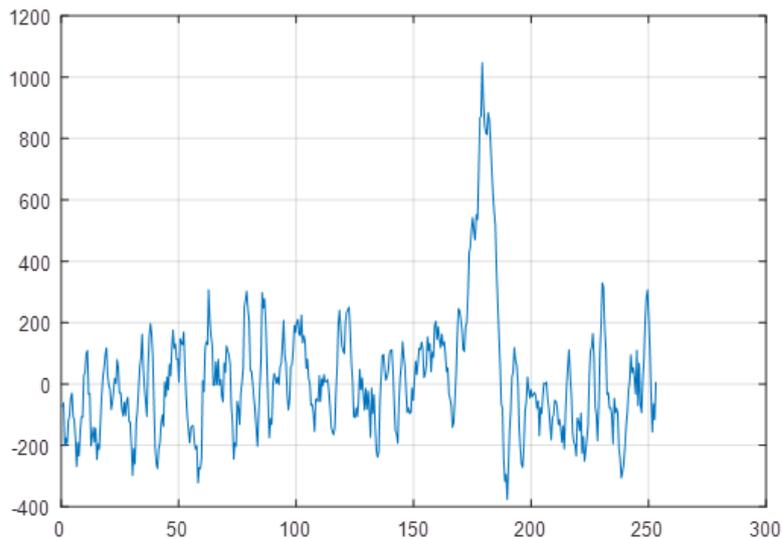


Figure 19: B0950+08 - 1 pulse intégré - 500bin/période

Cette figure révèle alors la présence d'un épaulement dans le flanc gauche du pulse de B0950+08. Le profil asymétrique de ce pulsar semble être connu. Cela pourrait révéler la présence d'une seconde composante radio et donner des détails sur le rayonnement de B0950+08. J'emploie le conditionnel car ces analyses vont bien au-delà de mes compétences et de mon imagination. Nous sommes plongés ici dans un autre monde très différent de notre environnement.

Un zoom sur la figure précédente permet également de vérifier la largeur du pulse à mi-puissance W_{50} .

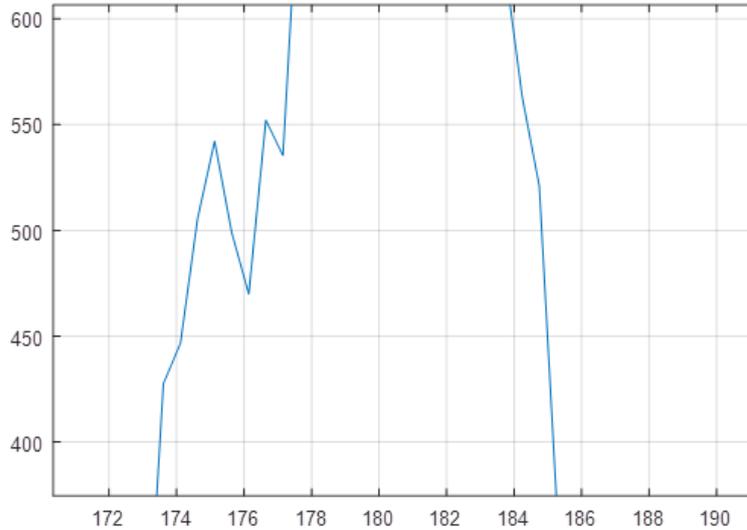


Figure 20: B0950+08 - 1 pulse intégré - W50

W50 est ici de l'ordre de 8 à 10 ms suivant si l'on intègre l'épaule ou non. C'est très proche de la valeur attendue.

7 Observation de B1133+16 – Pulsar n°3

Le choix de ce pulsar a été fait pour son flux moyen afin de connaître les limites de la station et pour sa position permettant une observation de jour l'été, ce qui est plus confortable à la station 21cm (RT). Sa dispersion est également très faible et son effet est négligeable.

Le flux de ce pulsar est extrêmement faible. Ce pulsar est le 6ème plus puissant de l'hémisphère Nord. Ses principales caractéristiques sont : Flux moyen S1400 = 32 mJy, largeur de pulse à mi-puissance W50 = 31.7 ms et Période de rotation P0 = 1.187913 sec.

La figure ci-dessous montre l'évolution du signal de B1133+16 en fonction du temps. L'axe X correspond à la période du pulsar, et l'axe Y correspond à la durée d'enregistrement de 1.5h (90 min) découpée en 8 trames de 713 sec (env 12 min).

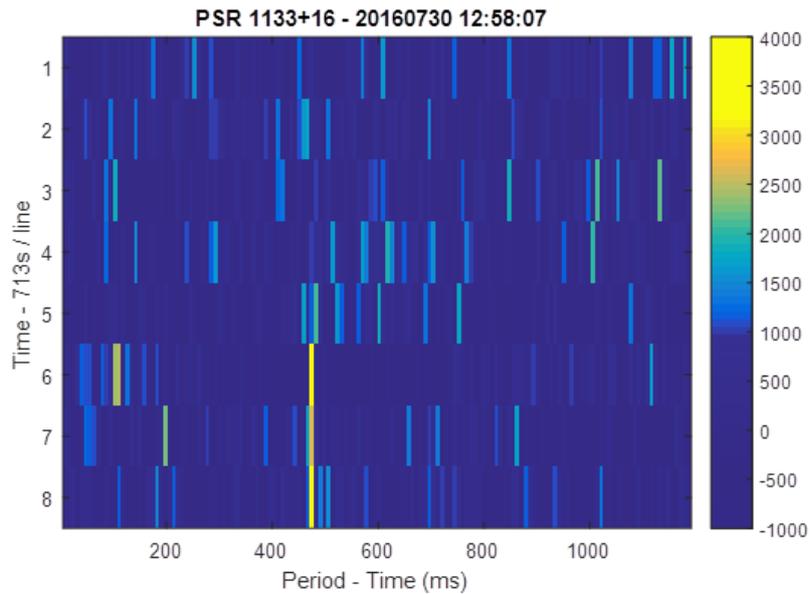


Figure 21: Waterfall 8 frames d'env. 12 mn

Cette figure montre l'effet de la scintillation comme prédit par les observations de Wolfgang à l'Astropeiler de Stockert. Durant 60% du temps, en début d'enregistrement, le pulsar est indétectable.

Par contre, en fin d'enregistrement, le niveau reçu semble au-delà du signal attendu et détectable même lors de trame courte d'environ 12 min.

La période mesurée est là aussi très proche de la période topocentrique prévue et calculée par PRESTO. La valeur corrigée est de 1187.99026 ms pour 1187.98948059 ms calculée.

La fréquence d'échantillonnage du RT est désormais parfaitement corrigée.

Un 2^{ème} enregistrement effectué avec une durée plus longue donne exactement le même constat concernant le niveau de signal et l'effet de la scintillation.

La figure ci-dessous montre la période du pulsar repliée sur la totalité de l'enregistrement avec une résolution de 150 bin/period (la période est plus longue que les pulsars précédents et donc plus d'échantillons sont nécessaires pour conserver une résolution temporelle correcte).

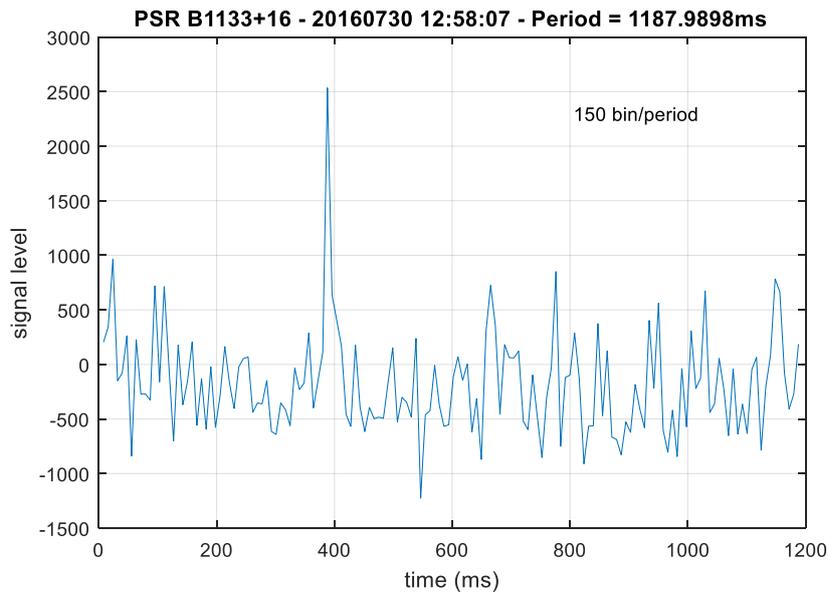


Figure 22: B1133+16 - 1 pulse intégré - 150bin/période

Comme attendu, le rapport signal à bruit est faible et la limite du RT est atteinte.

Toutefois, la qualité de la détection reste correcte. Le principe de détection synchrone permet également d'éliminer pas mal de signaux parasites susceptibles de perturber une telle mesure.

De plus le pulse de B1133+16 semble plus étroit que la valeur de $W_{50}=31.7$ ms trouvée dans la database. Un essai avec une résolution de 750 bins /sec révèle des détails sans trop altérer le rapport signal à bruit.

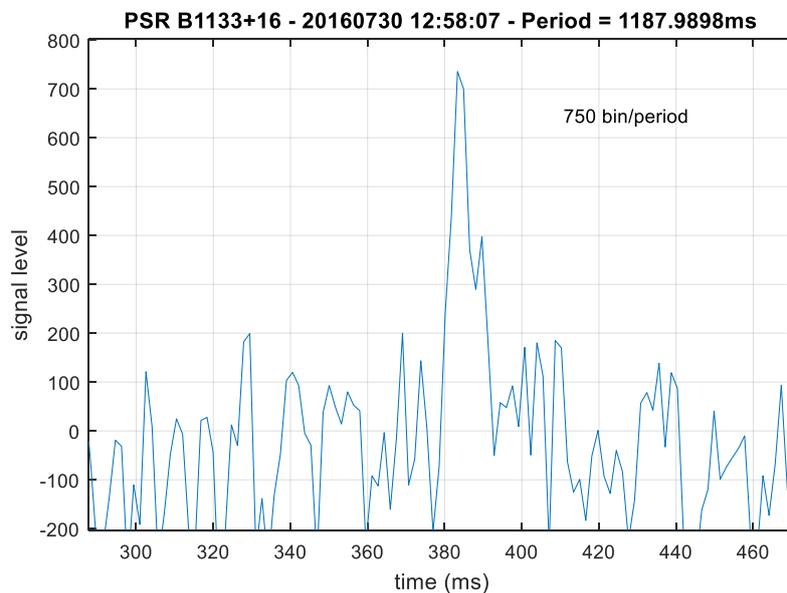


Figure 23: B1133+16 - 1 pulse intégré - 750bin/période

La largeur de pulse mesurée est bien plus faible que celle attendue. De l'ordre de 10 ms par rapport à $W_{50}=31.7$ ms de la database ATNF. Quelques recherches sur Internet m'ont conduit à ce papier <http://arxiv.org/abs/1511.08298v2> . Il publie des profils en fonction de la fréquence comme montré ci-dessous).

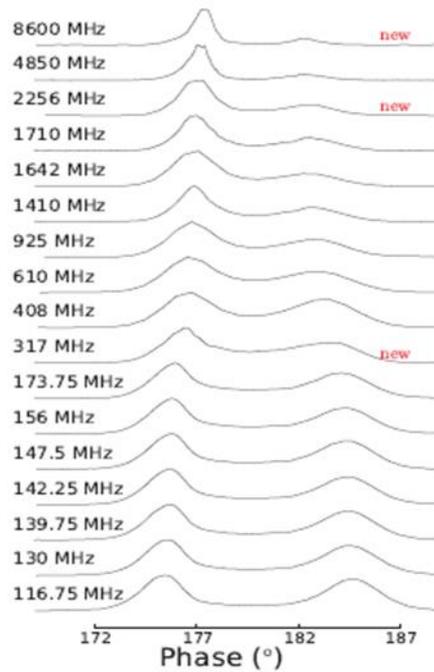


FIG. 1.— Multi-frequency profile of PSR B1133+16. All profiles have been normalized by their maximum flux densities and are aligned at phase ϕ_0 , which was obtained by fitting the profile to Eq. 6.

Il semble qu'à 21cm (1410 MHz), la mesure ne révèle que la composante principale du rayonnement du PSR. Et bien sûr, ce pulse est plus étroit. D'après le graphe env 4 ° de phase, équivalent à 13 ms ($4 \cdot P_0 / 360$, 360° de phase correspond à la période du pulsar). Ce papier donne en plus une hypothèse sur la structure en double cône du rayonnement et évoque la présence d'une 3ème composante. C'est impressionnant... c'est vraiment un autre monde !

En consultant les résultats de détection du RT Astropeiler Stockert à 21cm, leur mesure confirme également la largeur du pulse observé ainsi que la 2^{ème} composante.

http://astropeiler.de/sites/default/files/Pulsar_Observations_2015.pdf page 23

Une dernière mesure sur ce pulsar permet de visualiser la période sur 2 pulses repliés consécutifs. Bien sûr le rapport signal à bruit devient faible mais la période est clairement observée.

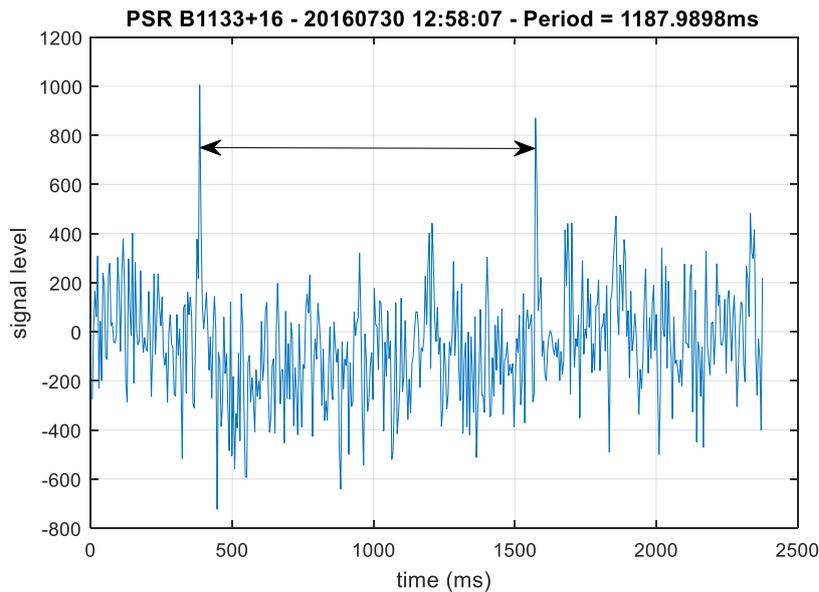


Figure 24: B1133+16 - 2 pulses intégrés - 750bin/période

8 Observation de B2020+28 – Pulsar n°4

Le choix de ce pulsar a été fait pour son flux moyen et correspond à l’item n°9 de la liste 21cm du site NS, sa position permettant une observation de jour en hiver. Sa dispersion est également faible et son effet est négligeable à 21cm.

Le flux de ce pulsar est très faible. Ce pulsar est le 4ème plus puissant de l’hémisphère Nord mais est réputé pour avoir une scintillation important (voir plus bas). Ses principales caractéristiques sont : Flux moyen S1400 = 36 mJy, largeur de pulse à mi-puissance W50 = 12 ms et Période de rotation P0 = 0.343402 sec.

Les simulations effectuées à propos de ce pulsar montre qu’un SNR de 4 soit 6dB est obtenu après au moins 6 heures d’intégration. Les 1ers essais effectués avec le RT décrit au début de cette note se sont révélés négatifs. Les principales causes de ces échecs sont la présence de signaux parasites mais principalement la stabilité d’horloge qui fluctue en fonction de la température (conditions hivernales). De plus, le temps d’observation étant doublé, la stabilité doit être améliorée.

8.1 Evolution du radiotélescope

Les principales modifications portent autour du module Teensy.

Les signaux parasites sont injectés via l’alimentation USB en provenance du PC. Pour corriger cela, une alimentation externe et un régulateur sont implantés dans le module de numérisation, voir §2.1 Chaîne de réception.

L’oscillateur du Teensy est basé sur un oscillateur à quartz. Pour améliorer la stabilité du Teensy, le quartz est retiré et une horloge de référence externe est injecté sur la pin 22 du MCU MK20DX256.

L’horloge de référence 16 MHz est réalisée autour d’un oscillateur référencé GPSDO et injectée à 0 dBm en lieu et place du quartz (pin 22).

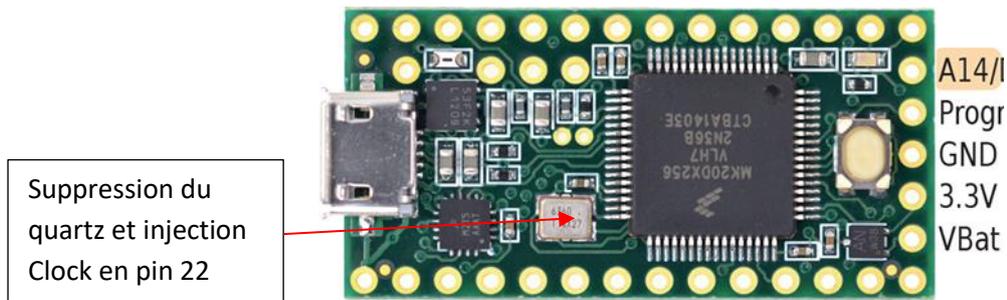


Figure 25 : Modification du module Teensy

8.2 Détection de B2020+28

La figure ci-dessous montre l'évolution du signal de B2020+28 en fonction du temps. L'axe X correspond à la période du pulsar, et l'axe Y correspond à la durée d'enregistrement de 7.5h (450 min) découpée en 15 trames de 1800 sec (30 min).

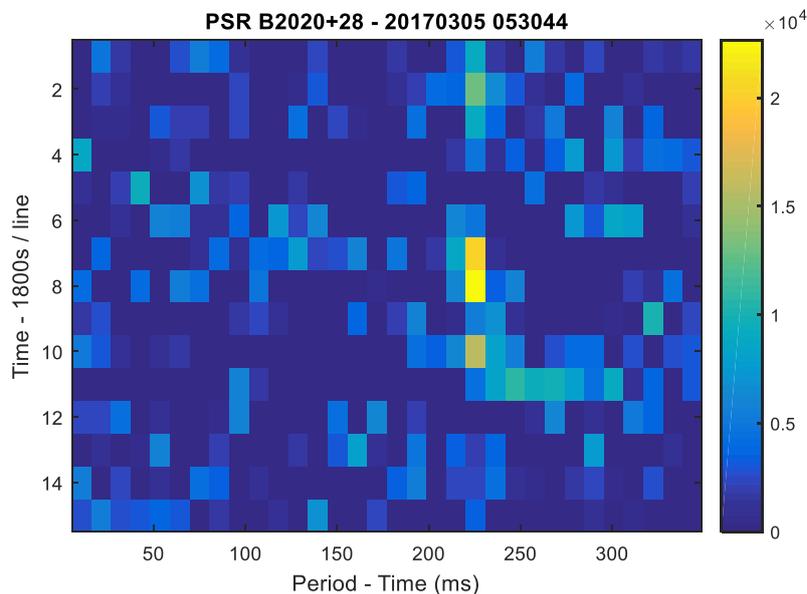


Figure 26: Waterfall 15 frames de 30 mn

Cette figure montre l'effet de la scintillation comme prédit principalement pour les trames 4 à 7 et à partir de la 11^{ème} trame. A la fin de l'observation, le pulsar n'est plus détectable sur une durée de 30mn. L'effet de la scintillation est détaillé plus bas.

La période mesurée est exactement la période topocentrique prévue et calculée grâce au nouvel outil du site Neutron Star (voir références). La valeur mesurée est de 343.393050 ms.

La figure ci-dessous montre la période du pulsar repliée sur la totalité de l'enregistrement avec une résolution de 64 bin/period (ce qui représente env ½ W50).

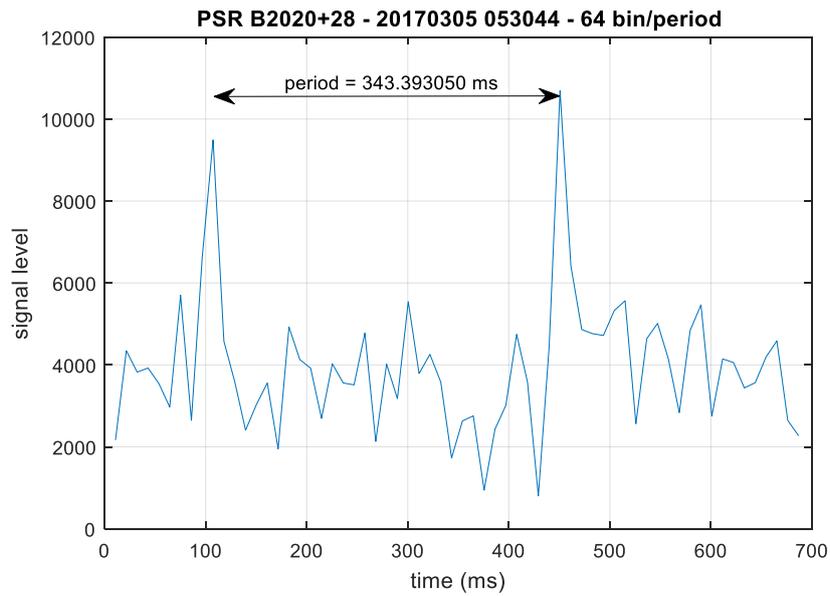


Figure 27: B2020+28 - 2 pulses intégrés – 64 bin/période

Comme attendu, le rapport signal à bruit est faible mais conforme aux attentes. La qualité de détection est très bonne et permet de présenter un résultat direct sur 2 périodes ainsi que les observations suivantes.

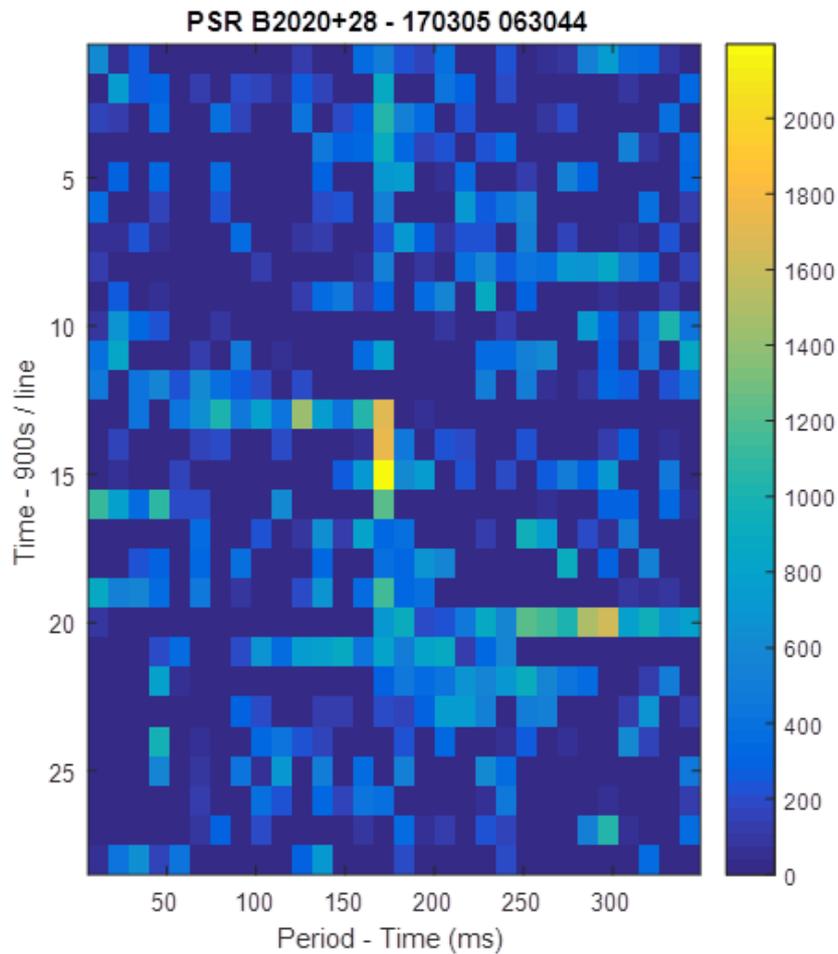


Figure 28: B2020+28 – Fenêtre glissante d'une heure par pas de 15 mn - 30bin/période

La figure ci-dessus montre le résultat utilisant une fenêtre glissante d'une heure avec un pas de 15 mn sur les 7 premières heures de l'enregistrement soit $7 * 1/4h$ ou 28 trames.

La figure ci-dessous représente le niveau bruit médian calculé sur les bins adjacents au pulse ainsi que le niveau du pulse en fonction du temps.

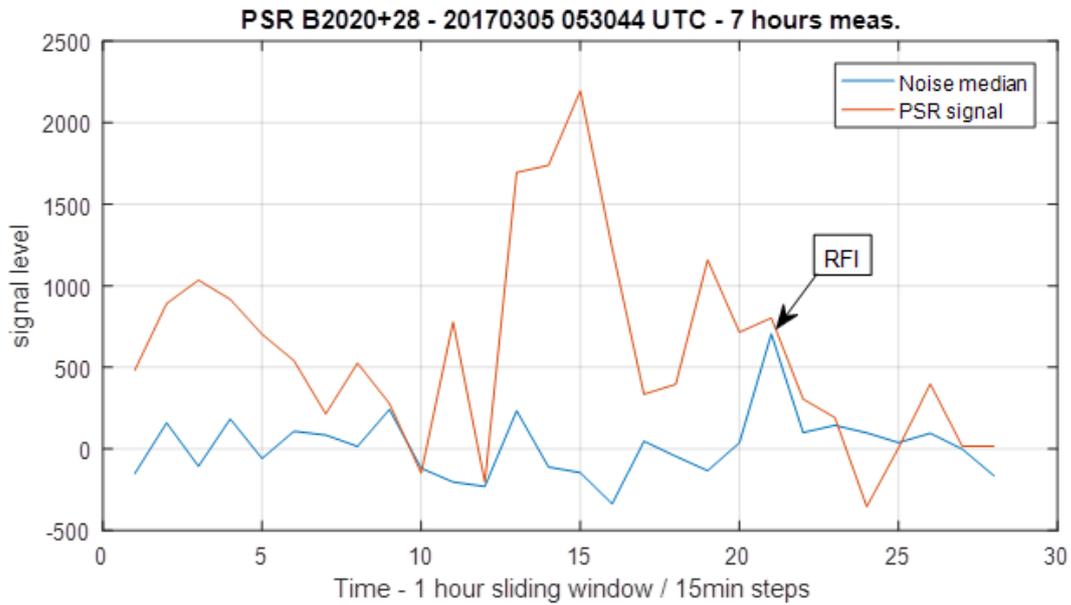


Figure 29 : B2020+28 - bruit médian et niveau du pulse

Nous pouvons voir ainsi l'effet de la scintillation sur le niveau de signal. En valeur moyenne, le niveau de signal correspond bien au flux moyen attendu. Les scintillations positives compensent bien les instants de scintillation négative.

Les derniers traitements sont consacrés à révéler le profil du pulsar. Sa largeur W50 est nominale.

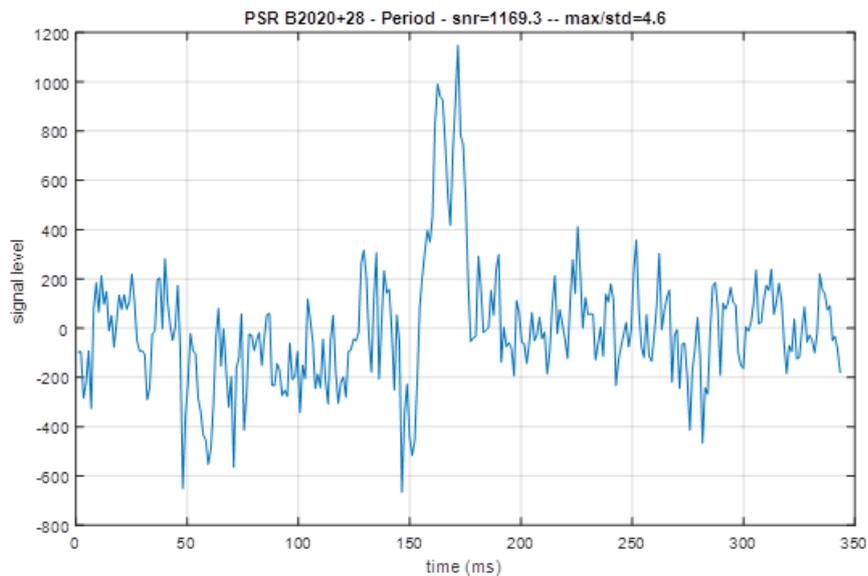


Figure 30 : Profil du pulsar B2020+28

Le profil observé est conforme au profil disponible dans la base ATNF ci-dessous. À 21cm, le profil d'impulsion moyen du PSR B2020 + 28 est relativement ordinaire, ayant 2 composantes d'émission principales bien résolues, ce qui semble commun d'après les experts (<https://arxiv.org/pdf/1605.06622.pdf>).

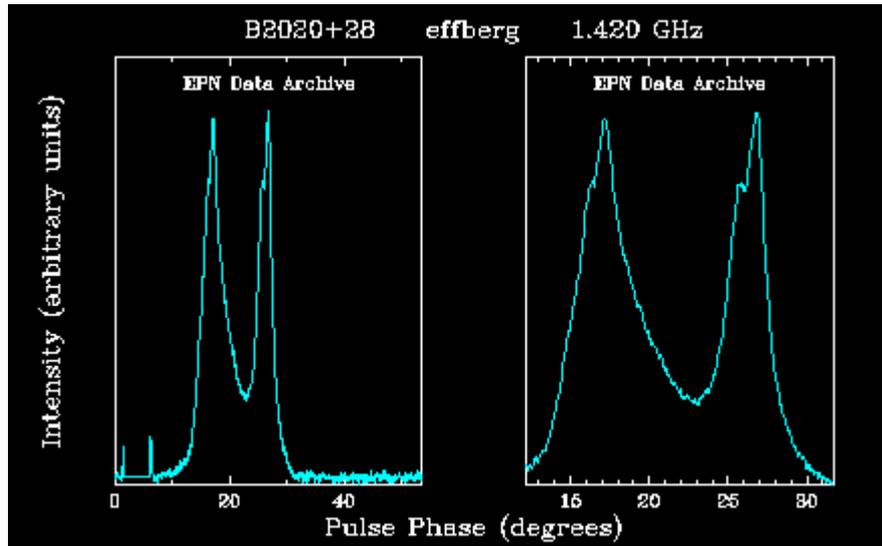


Figure 31 : Profil PSR B2020+28 - Base ATNF

9 Conclusions – Prochaines évolutions

Les modifications apportées aux RT 21cm ont permis des captures de pulsars fiables et reproductibles. La solution technique est vraiment simple et les efforts de synchronisation sont traités par logiciel. La stabilité de l'horloge de numérisation, ici celle du Teensy 3.2, a été améliorée et permet désormais des enregistrements longs, très stables et très précis. Ces améliorations ont permis de détecter B2020+28 présentant un flux moyen faible.

Le traitement de données permet de s'affranchir de signaux parasites et la détection synchrone rend les résultats plus robustes à des parasites ponctuels comme par exemple le trafic routier.

Les résultats obtenus sont très proches de ceux trouvés dans la littérature et permettent de révéler certaines caractéristiques des pulsars.

Encore une fois, le RT a permis de détecter des signaux extrêmement faibles et un nouveau challenge a été relevé après la difficile observation de M31. (Voir résultats sur mon site web).

Tous ces résultats sont également dus à quelques personnes que je souhaite à nouveau remercier pour leur aide, échanges et soutien : René Keller, Joachim Köppen, DF3GJ de l'équipe DLOSHF, Wolfgang Hermann du RT Astropeiler de Stockert, Steve OLNEY VK2XV, et Damien Boureille.

Après la détection de B1133+16 et de ce 4^{ème} pulsar B2020+28, d'autres détections sont envisageables.

D'autres évolutions sont à venir sur le RT. Il faudra probablement l'équiper d'un SDR large bande pour accéder à une fonction de dé-dispersion pour corriger les effets de la dispersion. Cette fonction sera obligatoire pour certains pulsars où la dispersion conduit à un étalement temporel supérieur à la durée de son pulse.

Références :

Quelques pages web qui contiennent pas mal d'information

<http://neutronstar.joataman.net/>

http://neutronstar.joataman.net/technical/rel_flux_density.html

http://neutronstar.joataman.net/technical/radiometer_eqn.html

<http://sat-sh.lernnetz.de/pulsarsE.html>

<http://sat-sh.lernnetz.de/pulsarsDetailsE.html>

<http://astropeiler.de>

http://astropeiler.de/sites/default/files/Pulsar_Observations_2015.pdf

<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>

Le RT 21cm – notre Galaxy @ 21cm : <http://www.youtube.com/watch?v=HGwkZY4E64k>

Mon site web. <http://www.f1ehn.org> page "radioastro".

Vous pouvez me contacter via email jj@f1ehn.org ou jim_f1ehn@wanadoo.fr