



**Traitement en temps réel des interférences radioélectriques sur
une carte numérique de nouvelle génération : UNIBOARD**

Real-time RFI mitigation on a new generation digital board: UNIBOARD

Samar Changuel^{1,2}, Rodolphe Weber^{1,2}, Cedric Dumez-Viou¹ et Dalal Ait-Allal¹

¹Observatoire de Paris – Station de radioastronomie de Nançay, F-18330 Nançay, France

{samar.changuel, dalal.ait_allal, cedric.dumez-viou}@obs-nancay.fr

*²Laboratoire PRISME, Université d'Orléans, Site Galilée, 12 rue de Blois, 45067 Orléans cedex 2, France
rodolphe.weber@univ-orleans.fr*

Mots clés : détection des RFI, cyclostationnarité, radioastronomie, FPGA, récepteur numérique.
Keywords: RFI mitigation, cyclostationarity interference, radio astronomy, FPGA, digital receiver.

Résumé

Les observations radioastronomiques sont de plus en plus perturbées par les signaux de télécommunications. Ce papier traite de la détection et de la suppression en temps réel des interférences radioélectriques causés par ces perturbations. D'une part, nous présentons l'architecture de la carte numérique UNIBOARD. Cette dernière est particulièrement dédiée au traitement intensif et en temps réel du signal radioastronomique. D'autre part, deux détecteurs d'interférences en cours d'implantation sur cette carte seront décrits. Le premier est un détecteur d'impulsions radar fondé sur des mesures robustes de la puissance. Le deuxième est un détecteur cyclostationnaire qui recherche des signatures statistiques spécifiques aux signaux de Télécommunications. Pour finir, nous analyserons différentes manières de gérer les échantillons qui ont été détectés comme pollués par les dits détecteurs.

Introduction

En radioastronomie, la présence croissante d'interférences radioélectriques (RFI : Radio Frequency Interference) dans les observations devient un problème préoccupant. Pour pouvoir se réappropriier pleinement l'ensemble du domaine spectral, notamment dans les basses fréquences entre 10 MHz et 4 GHz, la radioastronomie doit adapter son instrumentation et ses outils logiciels à ces nouvelles conditions. A court terme, l'objectif est de continuer à observer ce qui était auparavant observable et à long terme, de pouvoir observer même hors des bandes protégées avec des sensibilités de plus en plus importantes.

Dans le cadre du projet européen Radionet, la station de radioastronomie de Nançay, en collaboration avec l'Université d'Orléans, travaille sur l'implantation d'algorithmes de traitement en temps réel des interférences sur une carte de calcul numérique universelle, UNIBOARD. Dans ce papier, nous commençons par présenter ladite carte puis les deux techniques de détection de RFI qui y seront implantées : détecteur d'impulsions radar et détecteur cyclostationnaire. Pour finir, nous analyserons différentes manières de gérer les échantillons qui ont été détectés comme pollués par les dits détecteurs.

1. La carte numérique UNIBOARD

Le projet UNIBOARD est le résultat d'un développement collaboratif entre plusieurs institutions ou universités européennes. Il s'inscrit dans le cadre du projet européen Radionet FP7 [1]. L'objectif est le développement d'une carte de calcul numérique universelle associée à plusieurs applications dans le domaine de la radioastronomie. Plus spécifiquement, les développements matériels se partagent ainsi :

1. la carte Uniboard : ASTRON (NL), [1]
2. l'application « corrélateur pour la VLBI » : JIVE (NL) [2]
3. l'application « formation de voies pour un réseau au plan focal » : ASTRON (NL) [3]
4. l'application « récepteur numérique agile et large bande » : Observatoire de Bordeaux (F) et INAF (I)[4]
5. l'application « récepteur de signaux pulsar » : Université de Manchester (UK) [5]
6. l'application « traitement des interférences » pour les applications 4 et 5 : Station de Radioastronomie de Nançay et l'Université d'Orléans (F).

Cette carte est constituée de 8 composants programmables de la société Altera (Altera Stratix IV EP4SGX230KF40) qui, chacun, intègrent notamment 1288 multiplieurs 18bits x 18bits fonctionnant à 400MHz. La capacité de calcul attendue de cette carte est de 4 TMAC par seconde. Ces huit FPGA sont placés en deux colonnes comme le montre la figure 1. Les FPGA d'une colonne sont indépendants mais ils peuvent communiquer avec tous les FPGA de la colonne opposée via des transceivers à 10Gbits/s. Chaque FPGA dispose également de deux banques de mémoires SODIMM DDR3 4Go. Chaque FPGA de la colonne de gauche possède 4 liaisons 10-GbE pour se connecter directement vers l'extérieur grâce à des interfaces SFP+. Les FPGA de la colonne de droite peuvent s'interfacer à des convertisseurs analogique-numériques via quatre bus 32-bits LVDS. Ils possèdent également des transceivers 4x10Gb. En outre, divers liens Ethernet 1Gb permettent le contrôle de la carte et des FPGAs. La consommation de cette carte est de l'ordre de 400W.

2. Détecteurs d'interférences radioélectriques

Dans cette partie, nous présentons deux techniques de détection des RFI destinées à être implémentées sur la carte UNIBOARD. La première technique sert à supprimer dans le domaine temporel des interférences générés par des systèmes radar qui perturbent les observations. La deuxième technique exploite la périodicité cachée dans la construction des signaux traités pour détecter dans le domaine fréquentiel la présence des RFI.

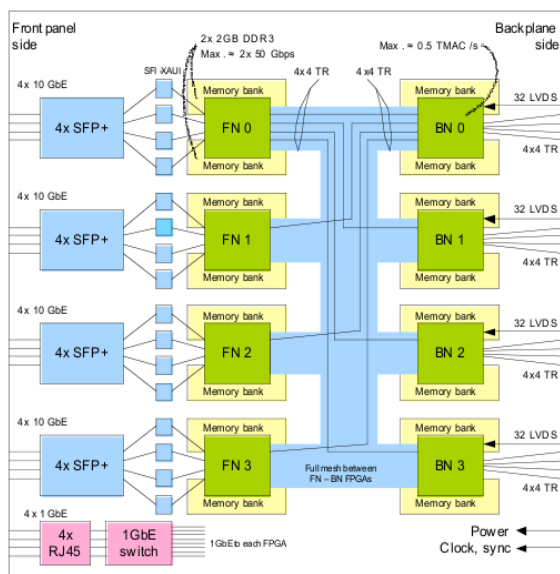


Figure 1 : Carte UNIBOARD (droite) Architecture de la carte (gauche) le prototype.

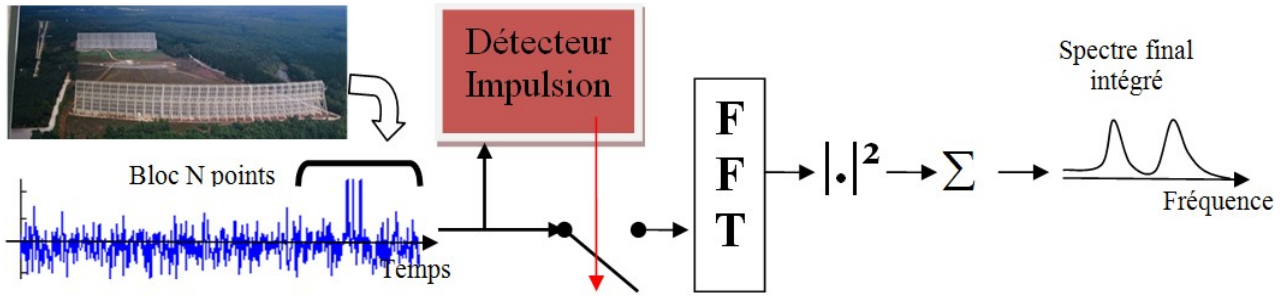


Figure 2 : Insertion du détecteur de RFI impulsif de type Radar dans la chaîne de traitement du NRT. Le Bloc de N points n'est transmis à la FFT que si aucun brouilleur n'est détecté par le système.

2.1. Détecteur de RFI impulsif de type Radar

Au NRT (Nançay Radio Telescope), une source majeure d'interférences provient des systèmes radars. Comme le montre la figure 2, les profils spectraux sont obtenus par intégration successive des spectres de puissance issus d'une FFT par blocs.

Pour la détection en temps-réel de ces impulsions radar sans information *a priori*, un détecteur robuste a été proposé dans [6]. Cette détection est effectuée sur la forme d'onde du signal observé (i.e. signal temporel échantillonné à valeurs complexes). En effet, une détection dans le plan temps-fréquence n'est pas adaptée car la puissance de l'impulsion est diluée sur plusieurs canaux fréquentiels. L'élimination radar est par conséquent insérée juste avant que l'estimation spectrale par FFT soit effectuée. Une copie de la forme d'onde est envoyée vers le détecteur d'impulsions qui prend la décision d'éliminer les blocs entiers situés autour de l'interférence (cf. Figure 2).

La tâche du détecteur d'impulsions radar consiste donc à détecter les blocs de données dont les échantillons associés dépassent un certain seuil. Cependant, l'efficacité de la détection dépend du choix du seuil de décision. Ce dernier est déterminé par un algorithme robuste qui limite les fausses alarmes. La figure 3 présente les quatre blocs du détecteur : (1) estimation de la moyenne, (2) détection d'impulsions fortes, (3) détection d'impulsions faibles et (4) décision sur l'élimination ou non du bloc de données.

La statistique des signaux naturels observés suit une loi gaussienne centrée. La statistique de leur puissance instantanée suit donc une loi du χ^2 à 2 degrés de liberté. Seule sa moyenne est nécessaire pour définir la statistique du signal. La valeur moyenne μ_{LPS} est estimée de façon récursive grâce à un filtre de type passe-bas IIR seuillé :

$$\mu_{LPS}[t] = \mu_{LPS}[t-1] + \text{CNT_MEM} (P[t] - \mu_{LPS}[t-1]) \quad \text{avec CNT_MEM} < 1 \quad (1)$$

Pour une bande traitée de 14 MHz, on choisit $\text{CNT_MEM} = 32/216 = 4.88 \times 10^{-4}$ de façon à assurer une constante de temps d'établissement du système légèrement inférieure à la milliseconde (0.67 ms : la période typique des radars rencontrés). La valeur du seuil S est calculée comme $S = \mu_{LPS} C$ avec C un paramètre défini par l'utilisateur. Pour des raisons de synchronisation et d'intégrité de signal, notre système supprime tout un bloc de données centré sur l'échantillon aberrant. Cette approche augmente notablement le taux de fausses alarmes global. Le taux de fausse alarme individuel est réduit en exploitant les propriétés temporelles des impulsions radar.

Pour des impulsions radar fortes, le seuil est fixé à $S = 4 \mu_{LPS}$. L'élimination du bloc de données a lieu si 3 échantillons consécutifs dépassent le seuil fixé. Un taux de fausse alarme de $(2,75\%)^3 = 2,1 \times 10^{-3}\%$ entraîne la suppression de seulement 6,4% des blocs de données de 2048 échantillons.

Quant à la détection des impulsions radar faibles, elle s'effectue sur une fenêtre temporelle plus large. La fenêtre choisie couvre 2 μs (la largeur typique d'une impulsion radar) soit 30 échantillons. Il est décidé qu'une impulsion faible est présente dans la fenêtre quand le nombre de détection est supérieur à 25. Le seuil est fixé à $S = 0.8125 \mu_{LPS}$. En utilisant une loi binomiale et la distribution du χ^2 , un taux de fausse alarme de $1,2 \times 10^{-3}\%$ est atteint, entraînant la suppression de 4% des blocs de données de 2048 échantillons.

Sur la figure 4, on présente une partie des observations menées sur le NRT de Nançay avec et sans élimination des impulsions radar. Les interférences radar n'altèrent plus la ligne de base de l'observation. Ce même algorithme va être implanté sur la carte Uniboard. La différence concernera les modalités de traitement des échantillons détectés comme pollués. Cet aspect est traité à la section 3.

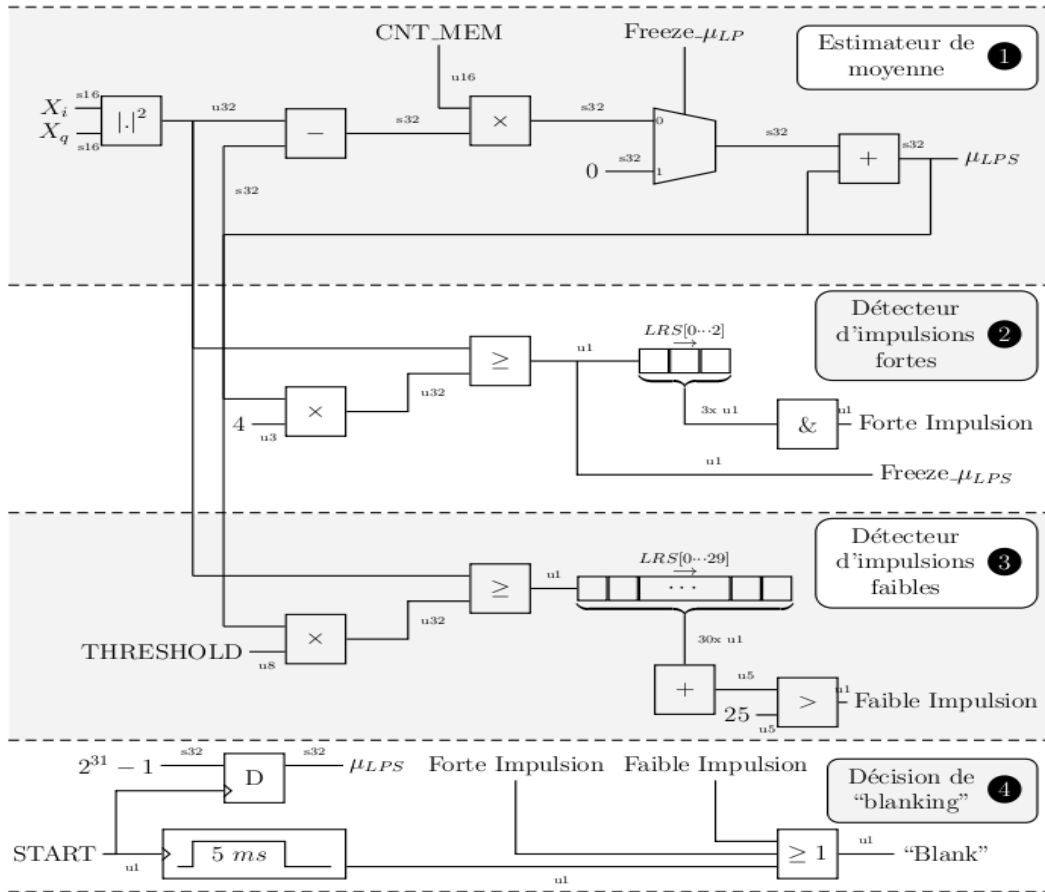


Figure 3 : Schéma du détecteur d'impulsion radar. LRS : Logical Right Shift. s et u précisent les largeurs de bus de données pour les opérandes signés et non signés.

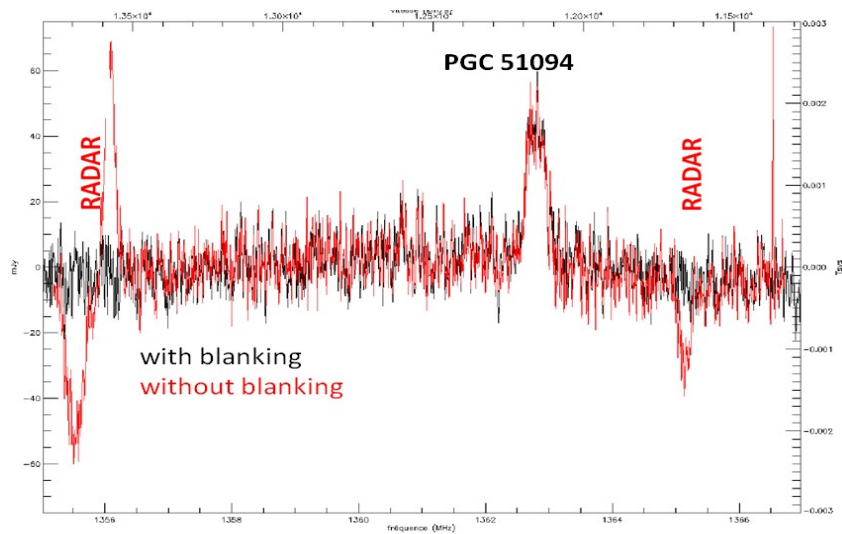


Figure 4 : Raie HI de PGC 51094 observée au NRT de Nançay avec (noir) et sans (rouge) élimination radar.

2.2. Détecteur cyclostationnaire

La plupart des signaux de télécommunication présentent une périodicité cachée en raison des caractéristiques périodiques impliquées dans la construction du signal (fréquence porteuse, vitesse de transmission, ...). Ces paramètres sont généralement brouillés et cachés par le caractère aléatoire du message à transmettre. Dans le cadre de notre travail nous nous sommes intéressés au décodeur cyclostationnaire basé sur le critère défini par :

$$C_n^\alpha = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |s|^2(n) e^{-j2\pi\alpha n} \quad (2)$$

où α est la fréquence cyclique représentant cette périodicité cachée et $s(n)$ est le signal observé. Ce détecteur repose sur une recherche de périodicités dans les fluctuations de la puissance instantanée. Pour rendre ce détecteur robuste aux variations lentes de puissance, nous considérons une version normalisée du critère précédent :

$$D_N^\alpha = \frac{\sqrt{N} C_N^\alpha}{C_n^0} \quad (3)$$

Le détail des performances de ce détecteur sont données dans [10]. Les étapes de détection sont :

1. Décomposition en sous-bandes du signal provenant du radiotélescope. Le signal dans chaque canal est maintenant algébrique. Ce processus est réalisé en temps réel par le récepteur numérique.
2. Pour réduire la complexité de calcul, l'algorithme n'est appliqué qu'à la partie réel du signal ($s_r(n)$). On calcule la transformé de Fourier, $FFT_N^m(f)$, sur N échantillons de $s_r^2(n)$ du m^{ème} canal, $m = 1 \dots M$, où M est le nombre de canaux.
3. On considère que la RFI est présente dans le m^{ème} canal si :

$$\exists k > 0 / \frac{\sqrt{N} |FFT_N^m(k)|}{|FFT_N^m(0)|} \geq \zeta \quad (4)$$

avec p_{fa} la probabilité de fausse alarme et $\zeta = \sqrt{-2 \log(p_{fa})}$.

La figure 5 montre quelques résultats obtenus d'une part par simulation et d'autre part en temps réel dans la bande décimétrique à l'observatoire de Nançay. Cet algorithme sera également implanté dans la carte Uniboard. La section suivante traite des options possibles une fois que les échantillons pollués sont identifiés.

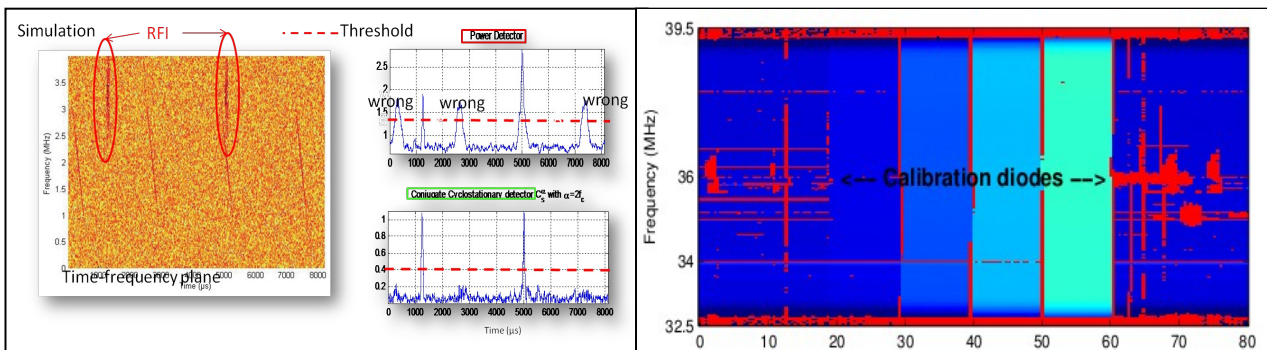


Figure 5 : Illustration du détecteur cyclostationnaire. (gauche) Simulation d'un plan temps-fréquence en puissance d'une observation pulsar. Un détecteur de puissance appliquée directement sur ces données détecterait les pulses du pulsar et de la RFI sans distinction (figure gauche haut, la position des pics correspond à la position temporel des signaux dans le plan temps-fréquence). Le détecteur cyclostationnaire ne détecte que les pulses des RFI (figure gauche bas). (droite) Spectre temps-fréquence de données réelles. Les zones rouges correspondent à la RFI détectée par le détecteur cyclostationnaire en temps réel. Les diodes de calibration simulent 4 impulsions pulsar d'amplitude croissante Comme prévu, ces pulses ne sont pas pris en compte par le détecteur. Le détecteur est appliqué sur chacun des 2048 canaux du spectre temps-fréquence. $N=2048$ échantillons sont utilisés pour faire la détection.

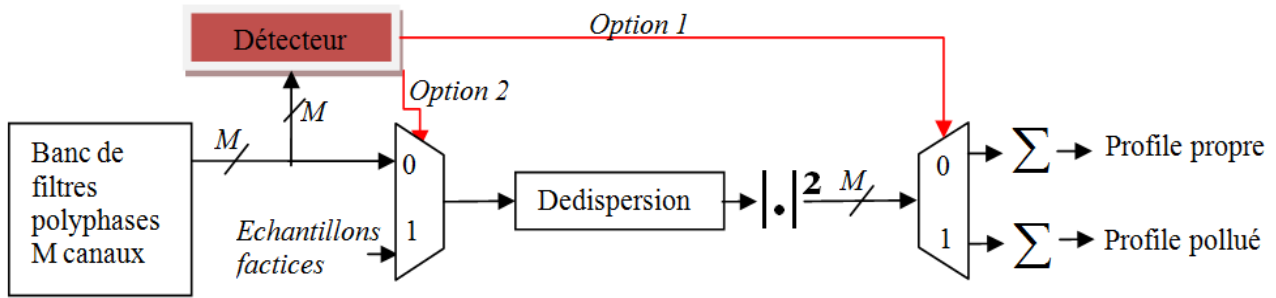


Figure 6 : Présentation des différentes options de traitement des échantillons pollués dans le cas d'un récepteur de signaux pulsar. La dédispersion est un traitement qui permet de compenser la dispersion induite par le milieu interstellaire. Option 1 : aiguillage et intégration différenciée des profils. Option 2 : les échantillons pollués sont remplacés par des échantillons factices.

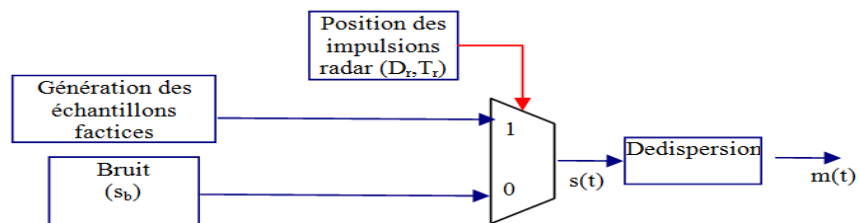


Figure 7 : Modèle de la chaîne de traitement utilisé pour comparer les différentes méthodes de reconstitution du signal observé. La puissance du bruit gaussien s_b est de 2.

3. Élimination des RFI

Une fois que les RFI ont été détectées, il faut prendre l'action appropriée pour garantir la qualité des observations obtenues. Nous nous proposons d'illustrer ce propos dans le cadre de l'application « récepteur de signaux pulsar » du projet Uniboard. La figure 6 illustre cette configuration. Deux options sont proposées :

- Soit fournir un signal qui indique au récepteur la présence d'échantillons pollués. Ces échantillons sont alors mis de côté pour une analyse ultérieure. Les échantillons peuvent même être classés par niveau de puissance. Cette option évite toute perte d'information mais elle alourdit les fonctionnalités du récepteur de signaux pulsar.
- La seconde option est plus directe. Il s'agit de remplacer les échantillons corrompus par des échantillons factices. Dans la suite, les conséquences de cet échange sur le signal observé sont évaluées.

Plusieurs définitions de ces échantillons factices sont possibles :

- Échantillons simplement remplacés par des zéros
- Échantillons choisis dans l'ordre dans une zone propre du signal observé.
- Échantillons choisis aléatoirement dans une zone propre du signal observé.
- Échantillons régénérés artificiellement suivant la distribution du signal propre.

Pour comparer ces différents choix, nous nous avons simulés une chaîne de réception pulsar (cf. figure 7).

Pour chaque méthode d'élimination des RFI nous avons calculé la moyenne et l'écart type de la puissance du signal reconstruit $m(t)$ en faisant varier la durée D_r des impulsions radar et leur période T_r . Les résultats sont reportés sur les figures 8 et 9 en fonction rapport cyclique $\rho_r = D_r / T_r$ des impulsions radar. Le rapport signal sur bruit étant de 10dB. La durée des blocs de données est de 128 échantillons. Sur la figure 9, nous avons tracé la limite de sensibilité définie par le rapport de l'écart type de la puissance sur la puissance moyenne. Sur ces 2 figures, les résultats obtenus pour un scénario sans RFI et pour un scénario avec RFI mais sans traitement sont donnés pour référence.

D'après la figure 8, on peut facilement remarquer que le remplacement par des zéros détériore rapidement la qualité des observations. Son usage doit donc être limité aux cas où seulement quelques échantillons sont pollués. L'option de remplacer les points détectés comme aberrants par des échantillons propres s'avère plus intéressante. En particulier, le choix des échantillons aléatoirement sélectionnés dans la zone propre du signal offre la meilleure solution. Ce résultat est confirmé en termes de sensibilité sur la figure 9.

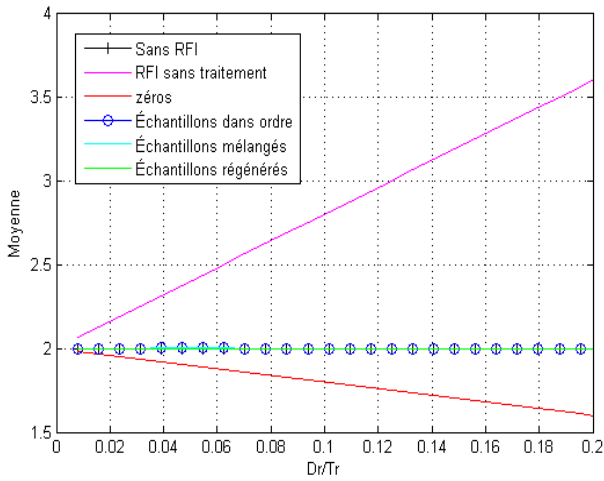


Figure 8 : Moyenne de la puissance du signal $m(t)$ pour chaque méthode d'élimination de RFI en fonction du rapport cyclique ρ_r des impulsions radar.

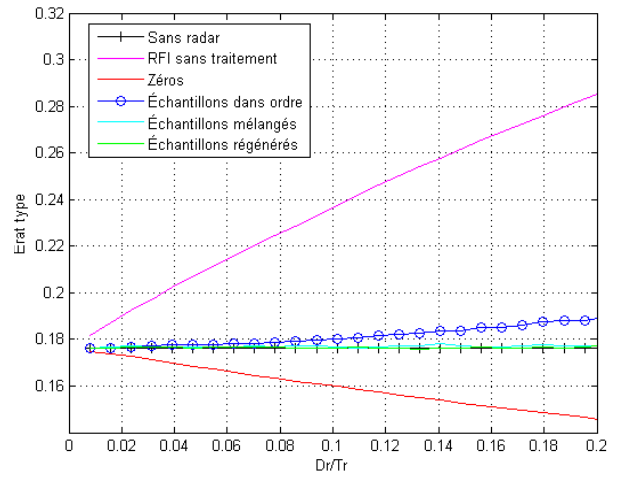


Figure 9 : Écart type de la puissance du signal $m(t)$ pour chaque méthode d'élimination de RFI en fonction du rapport cyclique ρ_r des impulsions radar.

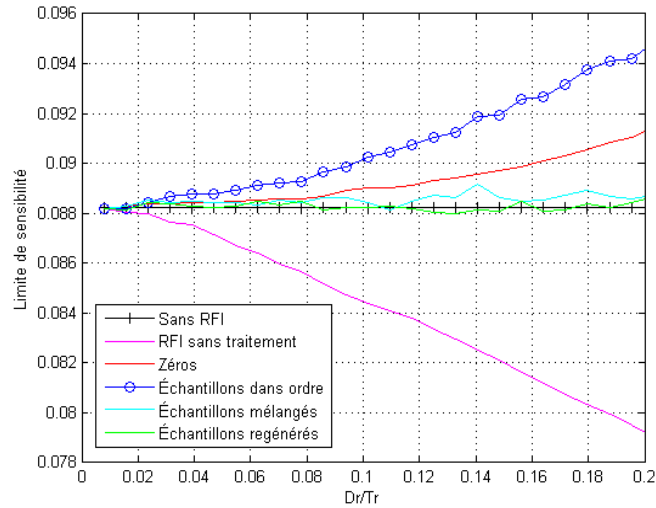


Figure 10 : Limite de sensibilité de la puissance du signal $m(t)$ pour chaque méthode d'élimination de RFI en fonction du rapport cyclique ρ_r des impulsions radar.

4. Conclusion

Deux techniques de détection de RFI ont été présentées dans ce papier. L'intérêt de ces techniques a été prouvé dans [8] et [9] dans le but d'observer des pulsars. Les résultats obtenus nous ont motivés à étendre ces techniques à d'autres domaines d'applications et de les implémenter sur la carte UNIBOARD. Cette carte va être utilisée dans la rénovation de l'instrumentation du radiotélescope de Westerbork (mise en œuvre d'un réseau d'antennes au foyer) et c'est un candidat sérieux pour le futur corrélateur de SKA.

Remerciements : Les auteurs voudraient remercier la commission européenne du FP7 (projet PrepPSKA (contrat n° 212243) et le projet Radionet UNIBOARD (contrat n° 227290)), l'ANR (contrat n° ANR-09-BLAN-0225-04) pour le financement d'une partie de ce travail.

Références bibliographiques

- [1] <http://www.radionet-eu.org>
- [2] J. Hargreaves, H. Verkouter, “*EVN Correlator Design*,” JIVE, <http://www.radionet-eu.org/fp7wiki/doku.php?id=jra:uniboard:documents>, March 2009.
- [3] A. Szomoru, P. Boven, J. Hargreaves, S. Pirruccio, S. Pogrebenko, A. Gunst, G. Schoonderbeek “*A UniBoard-based Phase I SKA Correlator and Beamformer*,” JIVE, ASTRON, <http://www.radionet-eu.org/fp7wiki/doku.php?id=jra:uniboard:documents>, February 2011.
- [4] G. Comoretto, A. Russo, G. Tuccari, A. Baudry, P. Camino, B. Quertier, “Uniboard Digital Receiver - Initial design document” <http://www.radionet-eu.org/fp7wiki/doku.php?id=jra:uniboard:documents>, October 2009.
- [5] Aziz AhmedSaid & Chris Shenton, “*UNIBOARD Pulsar Project Definition*,” <http://www.radionet-eu.org/fp7wiki/doku.php?id=jra:uniboard:documents>, June 2010
- [6] C. Dumez-Viou, “*Radioastronomical sources restoration from hostile radioelectric environment: Implementation of real-time detectors for dynamic spectra analysis*,” PhD thesis, Polytech'Orléans, September 2007.
- [7] D. Lorimer and M. Kramer “*Handbook of pulsar astronomy*,” Cambridge University Press, 2005.
- [8] D. Ait-Allal, R. Weber, C. Dumez-Viou, I. Cognard and G. Theureau, “*RFI Mitigation Implementation for Pulsar radio astronomy*,” EUSIPCO, Denmark, August 2010.
- [9] D. Ait-Allal, R. Weber, I. Cognard, G. Desvignes and G. Theureau, “*RFI mitigation in the context of pulsar coherent de-dispersion*,” EUSIPCO, Glasgow, August 2009.
- [10] R. Weber, P. Zarka, V. B. Ryabov, R. Feliachi, J.M. Grießmeier, L. Denis, R. V. Kozhyn, V. V. Vinogradov and P. Ravier, “*Data preprocessing for decametre wavelength exoplanet detection: an example of cyclostationary rfi detector*”, EUSIPCO'07, Poznan, Poland, Septembre 2007.