

Techniques d'observation en radioastronomie basse fréquence en présence d'émetteurs radioélectriques

RFI mitigation methods in low frequency bands for radio astronomy

Rodolphe WEBER¹, Pierre COLOM², Alain KERDRAON² et Alain LECACHEUX²

¹ LESI, Polytech'Orléans, Université d'Orléans, 12 rue de Blois, BP 6744, 45067 Orléans cedex 2, France, rodolphe.weber@univ-orleans.fr

² LESIA, Observatoire de Paris-Meudon, 5 Place Jules Janssen, 92195 Meudon, France, prenom.nom@obspm.fr

Résumé

La radioastronomie étudie les émissions de sources astrophysiques à partir de mesures de leur spectre électromagnétique. Malheureusement, l'explosion des moyens de télécommunications a considérablement accrue la pollution de ces mesures par des émetteurs radioélectriques. Par conséquent, leur élimination est devenue une nécessité en radioastronomie. Dans cet article, différents aspects de ce problème sont développés. D'une part, le contexte radioélectrique pour la radioastronomie française entre 10 MHz et 4 GHz est décrit. D'autre part, des exemples de stratégie de traitement des émetteurs radioélectriques ainsi que des implantations pratiques sont présentés.

Abstract

Radio astronomy studies the emissions of celestial sources through the radio spectrum. However, the exponential expansion of the telecommunications makes these emissions more and more corrupted by man-made radio emissions (RFI). Therefore, RFI mitigation is becoming a necessity in radio astronomy. In this paper, several aspects of this issue are developed. In particular, the RFI context for the frequencies between 10 MHz and 4 GHz is presented, examples of RFI migration strategy are given and some practical implementations are described.

1. Introduction

Depuis plusieurs années, les techniques instrumentales en radioastronomie doivent faire face à deux évolutions antagonistes. D'une part, l'explosion des moyens de télécommunications a généré une occupation croissante du spectre radioélectrique. Cela s'est traduit par une réduction du nombre et de la taille des bandes spectrales susceptibles de fournir des observations de qualité [1]. D'autre part, l'évolution des besoins scientifiques nécessitent et va nécessiter d'observer des bandes de plus en plus larges avec des sensibilités de plus en plus importantes.

Or bien que certaines bandes soient exclusivement réservées à la radioastronomie (statut primaire), la plupart du spectre électromagnétique est partagée avec des activités émettrices, la seule contrainte réglementaire étant l'obligation d'un accord national

visant à permettre le fonctionnement des radio-télescopes. La pression sur l'utilisation des ondes radio étant très forte, il est en pratique impossible d'obtenir une protection absolue dans la totalité de ces bandes.

De ce fait, pour pouvoir se réapproprier 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 terme, de pouvoir observer même hors des bandes protégées.

La résolution de cette problématique fait intervenir quatre acteurs principaux qui sont le signal astrophysique, l'émetteur radioélectrique, la méthode potentielle de traitement et le calculateur sur lequel sera implantée la méthode en question.

Dans un premier temps, nous nous proposons d'examiner la relation « signal astrophysique/émetteur radioélectrique » en brossant un tableau du contexte radioélectrique en basse fréquence. Ensuite, nous expliciterons quelques stratégies de traitement mettant en œuvre le couple « émetteur radioélectrique/méthode de traitement ». Nous poursuivrons sur la problématique instrumentale relative au couple « méthode de traitement/calculateur ». Enfin, nous terminerons sur une rapide prospective liée aux instruments de radioastronomie du futur.

2. Le contexte radioélectrique dans la bande 10 MHz – 4 GHz

Les conditions d'observations et de pollution radioélectrique étant très différentes suivant les bandes, nous allons brosser un tableau pour les trois gammes de longueur d'onde suivantes : décimétriques, métriques et décimétriques. En fait, ce découpage correspond aux trois bandes de fréquence respectivement observées par le réseau décamétrique (DAM), le radiohéliographe

(NRH) et le radiotélescope décimétrique (NRT), instruments exploités à la station de radioastronomie de Nançay [2], située dans le Cher.

2.1. La bande décimétrique [10 MHz – 100 MHz]

La bande des longueurs d'onde décimétriques a été utilisée dès le début du développement des télécommunications hertziennes. C'est aussi le domaine principal d'émission d'un grand nombre de phénomènes artificiels de décharge (commutations électriques, parasites industriels) ou naturels (orages atmosphériques). Le problème des interférences radio-électriques est donc devenu le souci principal des radioastronomes travaillant dans le domaine décimétrique, bien avant qu'il n'émerge dans le domaine des plus hautes fréquences. Il n'est pas rare de trouver, en dessous de 50 MHz, des émetteurs artificiels dont l'intensité est de 6 à 8 ordres de grandeur au-dessus du bruit galactique (dans une bande de 100 kHz). Heureusement, l'occupation de la bande décimétrique ne semble plus s'accroître, depuis une dizaine d'années [3], vraisemblablement parce que les télécommunications modernes utilisent préférentiellement des fréquences plus élevées (téléphone, TV, ...). Les effets de l'ionosphère terrestre, dont les couches réfléchissantes aux ondes radio décimétriques sont grandement variables, contribuent à rendre cette occupation largement non stationnaire. Même s'il existe d'autres sources d'interférences radio (éclaircs d'orages, bruits atmosphériques, émissions de Jupiter ou du Soleil actif), la plupart des émetteurs artificiels (radio diffusion sur ondes courtes) sont à bande étroite, en accord avec les règles internationales d'allocation de fréquences qui attribuent des canaux de 1 kHz et 3 kHz en dessous et en dessus de 30 MHz, respectivement. Donc, en supposant que la chaîne d'amplification du radiotélescope puisse accepter les niveaux requis sans distorsion, on peut s'attendre à limiter les effets de la plupart des émetteurs artificiels en utilisant des récepteurs avec une résolution spectrale suffisante. Une illustration est fournie par la figure 1. La bande de fréquences comprises entre 21.5 MHz et 21.9 MHz est inutilisable pour l'observation astronomique lorsqu'on utilise une résolution spectrale "classique" de 12 kHz, alors qu'avec une résolution de 760 kHz, le bruit du fond du ciel peut être atteint dans une large proportion du spectre analysé (de l'ordre de 50%). Cela signifie que la situation peut déjà être grandement améliorée par l'utilisation de traitements en temps réel "simples", consistant en un masquage adaptatif du plan temps-fréquence effectué dans le domaine numérique. Ce procédé, qui permet de conserver la sensibilité de détection ultime, même en présence de nombreux émetteurs, est maintenant implanté couramment sur plusieurs radiotélescopes décimétriques (DAM en France, UTR-2 en Ukraine). Naturellement, ce procédé n'est valable qu'en cas d'observations continuum - le plus fréquent en ondes décimétriques - et se révélerait inopérant en cas d'observations spectroscopiques ou à fréquence imposée. La recette n'est donc pas

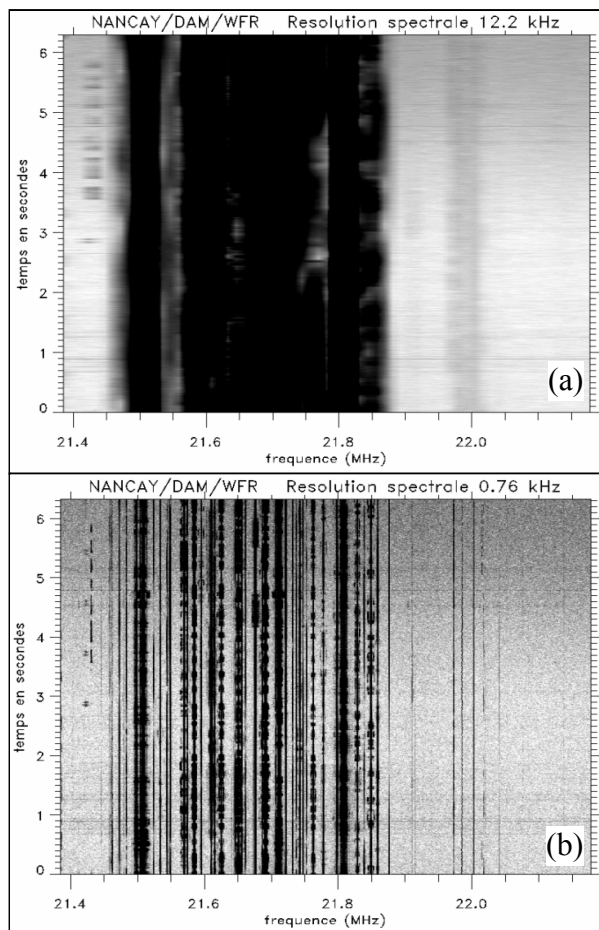


Fig.1. – Spectre de puissance temps-fréquence observé avec le DAM. (a) résolution spectrale « classique » de 12 kHz : le spectre est inexploitable (b) résolution spectrale « fine » de 760 kHz : les canaux des émetteurs sont bien différenciés. Des techniques de filtrage peuvent être envisagées.

simplement transposable aux observations radio astronomiques aux plus hautes fréquences.

2.2. La bande métrique [100 MHz – 1 GHz]

Cette bande est partiellement utilisée à Nançay pour l'observation du Soleil. L'observation à différentes fréquences permet d'étudier le comportement de l'atmosphère solaire (couronne solaire) à différentes altitudes, les fréquences les plus basses correspondant aux altitudes les plus élevées. Il s'avère qu'une observation correcte des phénomènes solaires nécessite une couverture quasi-continue de la bande, et donc l'utilisation des fréquences non protégées pour la radioastronomie.

En particulier, les éruptions solaires se produisent en moyenne à une altitude qui correspond à 500 MHz, et il est scientifiquement très important d'observer les émissions produites en dessous (fréquence plus élevée) et au-dessus (fréquence plus basse) de l'éruption.

Bien entendu, l'intérêt scientifique de cette bande ne se limite pas au Soleil. En particulier, les galaxies lointaines affectées par l'expansion de l'univers voient leur raie d'émission de l'hydrogène (normalement à

1420 MHz au repos) décalée vers cette bande de fréquences.

2.2.1. Le contexte radioélectrique.

Cette bande est caractérisée par la présence de nombreux émetteurs de radiodiffusion de très forte puissance. Citons les radios en modulation de fréquence (FM) en bas de bande (en dessous de 108 MHz), et la télévision, vers 200 MHz, puis de 460 MHz à 860 MHz. La bande FM est totalement occupée, et inutilisable par la radioastronomie. Par contre, des bandes libres entre les émetteurs de télévision peuvent être potentiellement utilisées. Cependant, la puissance reçue des émetteurs les plus proches (plus de 80 dB au-dessus des signaux solaires) pose un sérieux problème aux récepteurs, et un filtrage très en amont peut se révéler nécessaire.

À une puissance plus faible, se trouve la bande GSM à 900 MHz, dont l'occupation est très dense. Le reste de la bande est surtout occupé par des émetteurs de télécommunication de faible puissance. Leur occupation spectrale et temporelle est faible, car ils ont une bande très faible, et leurs émissions sont souvent sporadiques.

Enfin, plusieurs bandes sont réservées aux satellites. La puissance reçue dans le lobe principal des antennes peut alors atteindre des niveaux élevés, et la réjection en fréquence limitée des récepteurs peut nous forcer à nous éloigner de ces fréquences satellites. Il faut enfin ajouter qu'au moins une bande satellite est contiguë avec une bande allouée à l'astronomie (149,95 MHz), rendant impossible l'utilisation d'une partie de celle-ci (fig.2).

2.2.2. Le contexte opérationnel.

Les émissions solaires sont généralement observées avec des résolutions temporelles élevées, autrement dit les temps de pause sont très courts. De ce fait, la présence d'émetteurs très faibles, nécessitant des temps d'intégration importants pour être détectés, est moins problématique que dans d'autres bandes (voir la bande décimétrique par exemple). Il y a donc quelques espoirs pour qu'une détection en temps réel des canaux de fréquence parasités conduise à des observations propres dans une bonne partie de cette bande.

Néanmoins, les émetteurs de radiodiffusion très puissants posent un problème qui reste encore très difficile à traiter efficacement. A Nançay, la gestion des émetteurs de télévision et FM nécessite l'installation dans chaque antenne de cinq filtres analogiques spécifiques. Cette solution est coûteuse pour un interféromètre constitué d'environ 50 antennes. De plus, ces filtres posent des problèmes de bruit et enlèvent une bande nettement supérieure à celle réellement occupée par les émetteurs.

2.3. La bande décimétrique [1GHz – 4 GHz]

En 1951, la première raie radio détectée fut celle de la transition hyperfine de l'atome d'hydrogène (HI) dans

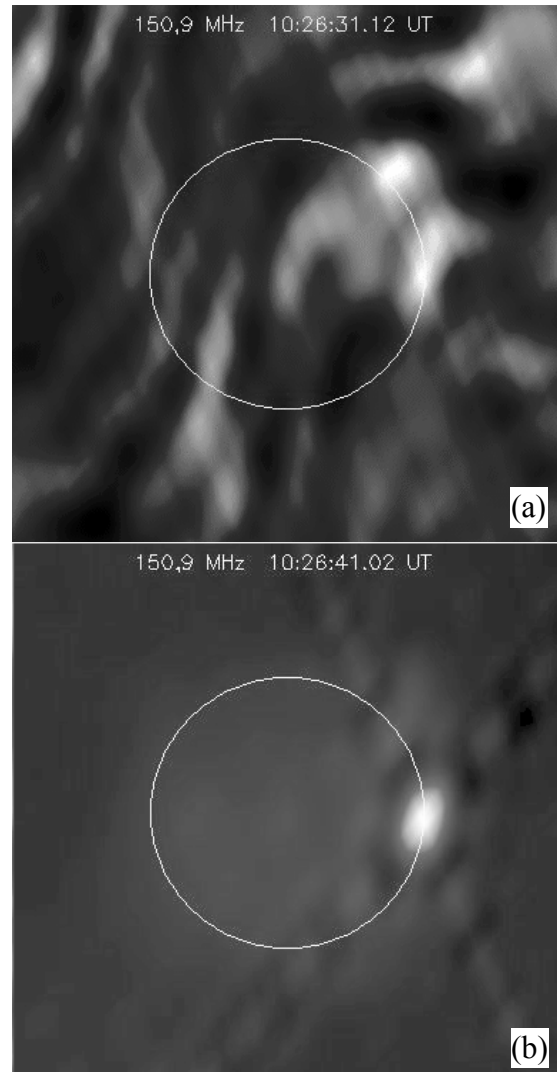


Fig.2. – Images du Soleil obtenues avec le NRH à la fréquence 150,9 MHz. Le cercle représente le diamètre optique. (a) En présence d'un émetteur radioélectrique, l'image est complètement brouillée. (b) En l'absence d'émetteur, la zone d'activité solaire est clairement visible (la croix est due à la fonction de transfert de l'interféromètre).

son état fondamental à 1 420,405 752 MHz. La bande de fréquences correspondante (1400 MHz-1427 MHz) est la plus large qui soit réservée exclusivement à la radioastronomie décimétrique.

Elle a une importance considérable en astronomie, car elle trace la présence de l'élément le plus abondant dans l'Univers. Notamment, elle a permis d'établir la structure spirale de notre galaxie. Actuellement avec le NRT, elle permet de mesurer le contenu en hydrogène atomique des galaxies jusqu'à au moins 200 mégaparsecs. A un horizon plus lointain, le projet *Square Kilometre Array* (SKA) [4] en fait un de ses objectifs premiers, afin de mesurer l'Univers jusqu'à plusieurs milliards d'années lumière.

Deux molécules importantes dans l'étude de notre galaxie ont des transitions radio: OH à 18 cm et CH à 9 cm. La découverte de molécules en radioastronomie dans les nuages interstellaires sombres a commencé par OH en 1963. Ce radical possède des transitions radio à 1612 MHz, 1665 MHz, 1667 MHz et 1720 MHz. Il

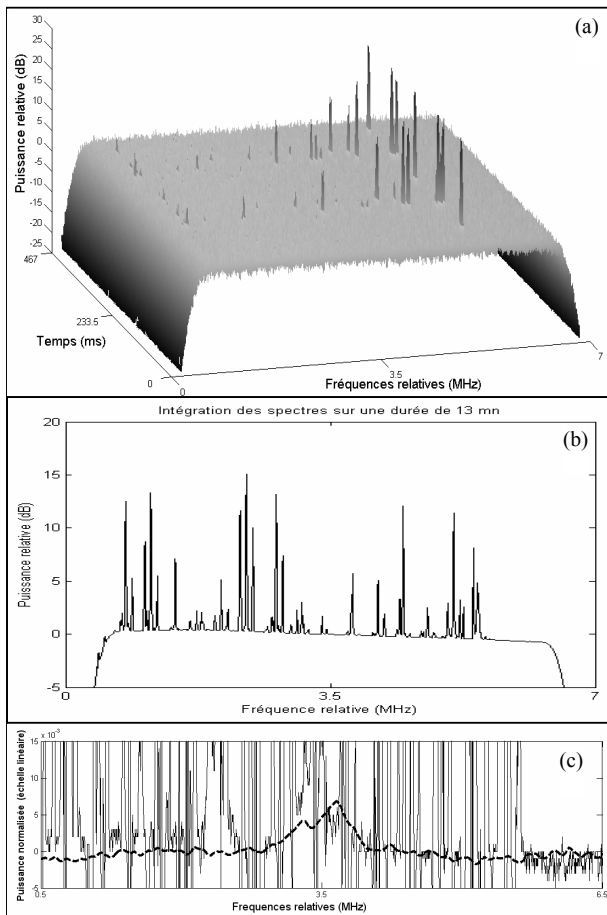


Fig.3. – Exemple de masquage temps-fréquence d'un émetteur TDMA en bande décimétrique. (a) les impulsions sont clairement visibles sur cet échantillon du spectre temps-fréquence. La source astrophysique (IIIZW35) est noyée dans le bruit autour de 0 dB. (b) Le spectre moyenné pendant 13 mn sans masquage. La présence de l'émetteur rend inexploitable ce spectre intégré. (c) Zoom après normalisation différentielle sans masquage (trait continu) et avec masquage (trait pointillé épais). Le critère de puissance utilisé permet de conserver 97.5% de l'information tout en éliminant les pics dus au brouilleur [8].

donne lieu à un effet MASER dans certaines régions de formations d'étoiles, dans les étoiles géantes rouges qui perdent leur enveloppe, et dans les comètes.

En dehors des raies atomiques et moléculaires, l'observation radio continuum est vitale car elle permet d'étudier les émissions non thermiques des objets les plus énergétiques, tels les quasars à l'échelle extragalactique, les pulsars (voir l'article de I. Cognard dans ce numéro), les micro quasars, les binaires X et autres étoiles à éruptions à l'échelle galactique.

2.3.1. Le contexte opérationnel.

Les constantes de temps utilisées par les systèmes d'analyse actuels vont de 1 seconde à quelques minutes. Les astronomes ont besoin de mesurer des signaux typiquement mille fois plus faibles que la puissance du bruit de fond, hors parasites. Différentes procédures de mesures existent, mais toutes visent à soustraire cette puissance par des mesures différentielles afin de révéler la source astronomique, et à intégrer jusqu'à plusieurs

heures d'observation afin de diminuer les fluctuations de la puissance du bruit de fond.

2.3.2. Le contexte radioélectrique.

Le problème est qu'en cherchant à mesurer la raie de HI dans des galaxies de plus en plus lointaines, le décalage vers le rouge est accentué. De ce fait, les fréquences à observer baissent en deçà de la bande primaire, et rentrent dans une bande avec statut secondaire: de 1330 MHz à 1400 MHz en Europe, hélas seulement de 1370 MHz à 1400 MHz en France ! Plus bas en fréquence, aucune protection n'est prévue dans le domaine décimétrique.

Les émetteurs qui peuvent être détectés dans cette bande sont des radars, des émissions de satellites vers la Terre (radionavigation, télécommunication,...), de la téléphonie mobile et de la radiodiffusion numérique.

3. Les aspects algorithmiques

Pour continuer à faire des mesures spectrales en environnement radioélectrique perturbé, il faut développer des algorithmes capables de nettoyer en temps réel les signaux reçus. De nombreux concepts ont déjà été envisagés par différents auteurs [5]. Conceptuellement, trois scénarios sont possibles en fonction du degré de mélange entre le signal astrophysique et l'émetteur.

3.1. Mélange nul

Le cas le plus sympathique se produit lorsque la source astrophysique et l'émetteur ont au moins un support (spatial, de polarisation, temporel ou fréquentiel) différencié. Théoriquement, un filtrage adapté permet alors de séparer exactement les deux composantes. En pratique, le filtrage fréquentiel est systématiquement utilisé. Le filtrage spatial commence à être exploité sur les instruments de nouvelles générations à base de réseaux d'antennes tels les projets *Low Frequency Array* (LOFAR) actuellement en construction en Hollande [6,7], ou SKA dans un horizon plus lointain [4].

Par contre, une discrimination par polarisation reste très anecdotique. De même, une dissociation temporelle n'est que très rarement envisageable puisque les sources astrophysiques émettent le plus souvent en continu.

3.2. Mélange partiel

La grande majorité des instruments actuels sont à antenne unique. De fait, ils sont dépourvus de toute capacité de discrimination spatiale. Néanmoins, si les supports (essentiellement fréquentiels et/ou temporels) se recouvrent partiellement, il est alors envisageable de détecter les zones fréquentielles et/ou temporelles polluées afin de les masquer.

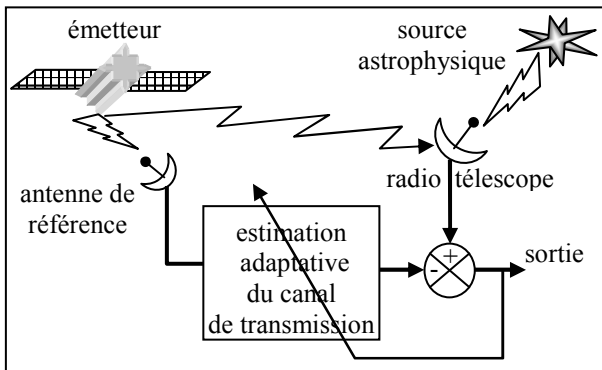


Fig.4. – Utilisation d'une antenne de référence pointée sur l'émetteur. Une attention particulière doit être portée sur l'estimation adaptative notamment en environnement non-stationnaire [9].

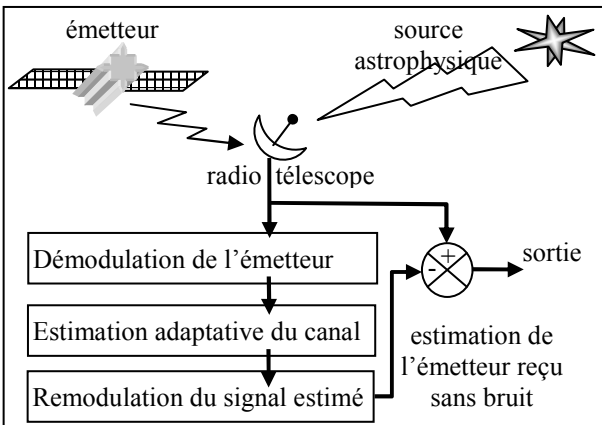


Fig.5. – Synthèse paramétrique de l'émetteur à partir d'une antenne commune. L'estimation du message binaire émis permet d'éliminer le bruit et de resynthétiser un signal émetteur reçu après estimation du canal de transmission [10].

Etant donné la nature spectrale des mesures, les masques fréquentiels ont été les premiers traitements mise en œuvre par les radioastronomes. Le masquage temporel, quant à lui, est très bien adapté aux émetteurs impulsions tels les radars ou les modulations de type *Time Division Multiple Access* (TDMA) où un canal fréquentiel est divisé en créneaux temporels qui sont alloués dynamiquement. Un exemple de traitement de tels émetteurs est donné à la figure 3.

3.3. Mélange total

Finalement, si aucune discrimination n'est possible, notamment lorsque les émetteurs diffusent en continu sur le même domaine temps-fréquence que la source astrophysique, des méthodes d'estimation-soustraction doivent être mise en oeuvre. Elles peuvent s'appliquer sur la forme d'onde, soit à partir d'une antenne de référence pointée sur le brouilleur (fig. 4), soit directement sur l'antenne radioastronomique (fig. 5). Dans les deux cas, une des difficultés est alors l'estimation adaptative du canal de transmission. Une autre possibilité est de travailler directement sur le spectre de puissance en estimant par modélisation les parts respectives du brouilleur et de la source astrophysique. Des modèles statistiques ont déjà été testés pour des brouilleurs sinusoïdaux [11], et des travaux sont en cours sur des brouilleurs cyclostationnaires [12].

4. Les aspects instrumentaux

Les performances des algorithmes peuvent être complètement anéanties si le système d'acquisition se trouve ébloui par l'émetteur. Or, la plupart des récepteurs de radioastronomie codent le signal sur quelques bits (1-bit de quantification est théoriquement suffisant si le signal observé a essentiellement les caractéristiques d'un bruit blanc). Par conséquent, en présence d'émetteurs, les non-linéarités induites par cette faible dynamique satureront complètement les observations, empêchant toute exploitation ultérieure.

L'évolution du contexte radioélectrique nécessite donc la mise en œuvre de systèmes de réception capables d'une part de supporter de grandes dynamiques et d'autre part de réaliser des fonctions du traitement de signal plus diversifiées que la classique analyse spectrale. A cela s'ajoute également un besoin scientifique d'observer des bandes de plus en plus larges.

Diverses architectures pour ces récepteurs de nouvelle génération sont actuellement testées. Beaucoup de questions sont encore en suspens et les réponses ne sont pas uniques : Quelle arithmétique privilégier ? Combien de bits pour traiter le signal ? Quel type de calculateur ? Quelle part de matériels et de logiciels ? Plutôt des grappes de PC, des cartes électroniques avec des composants numériques reconfigurables ou un mixte des deux ? Quelques exemples de stratégie instrumentale sont décrits ci-après.

4.1. Nouvelle génération de récepteur numérique à Nançay

La station de radioastronomie de Nançay s'est progressivement dotée d'outils permettant une cohabitation plus ou moins efficace avec les différents émetteurs auxquels elle est confrontée. D'outils logiciels exploitant les spectres mesurés dans un premier temps, en passant par des systèmes de détection analogiques [13], elle dispose actuellement de récepteurs à grande dynamique dont le plus récent, totalement reconfigurable, permet d'envisager des traitements en temps réel [8].

Dans sa configuration de base (fig.6), ce récepteur permet de sélectionner une bande comprise entre 14 MHz et 875 kHz. Une analyse spectrale est ensuite

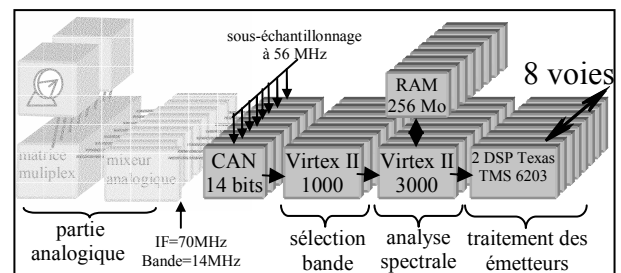


Fig.6. – Architecture matérielle et fonctionnelle du récepteur Reconquête. Le récepteur gère 8 voies identiques en parallèle. Le convertisseur analogique numérique (CAN) est sur 14 bits. Par voie, deux composants logiques reconfigurables (Virtex) et deux processeurs numériques (DSP) sont disponibles pour traiter le signal.

effectuée. La résolution spectrale est comprise entre 256 et 8192 canaux. Pour le cas 8192 canaux, un banc de filtres polyphasés à 49152 coefficients a été implanté. Il permet de garantir une réjection entre canaux supérieure à 70 dB. En final, deux processeurs de signaux peuvent être utilisés pour des opérations de détection ou d'estimation. Par exemple, ils ont été utilisés pour réaliser l'observation de la source IIIZW35 illustrée en figure 3.c.

4.2. LOFAR et SKA

LOFAR [7] est un grand réseau interférométrique couvrant la gamme de 10 à 220 MHz en cours de construction aux Pays-Bas. Le site central regroupera 25% des antennes, et les sites périphériques, répartis jusqu'à une distance de 400 km, permettront de couvrir le plan des fréquences spatiales (U-V) sans avoir recours à la rotation terrestre.

Chaque site sera constitué d'un réseau phasé d'antennes. Une bande de 32 MHz issue de chaque antenne sera tout d'abord analysée au travers d'un banc de filtres polyphasés de 256 canaux. Les canaux contenant des émetteurs seront éliminés. Ensuite, un filtrage spatial sera appliqué. Finalement, chaque canal sera lui-même re-décomposé en 256 sous-canaux où une détection d'émetteurs sera à nouveau mise en œuvre.

SKA [4] est un projet à horizon 2020. Sa surface collectrice sera de 1 km². Il couvrira la bande entre 150 MHz et 20 GHz, il aura des capacités multifréquences et multifaisceaux. En terme de techniques de traitement des émetteurs, il sera dans l'esprit de LOFAR.

4.3. Frequency Agile Solar Radio Telescope (FASR)

FASR est un interféromètre solaire qui devrait rentrer en phase opérationnelle vers 2009. Il couvrira la bande de fréquence entre 200 MHz et 24 GHz. La relative compacité de l'instrument (une certaine d'antennes localisées sur un même site) autorise une gestion globale et uniforme des émetteurs artificiels.

Le signal de chaque antenne devrait être décomposé au travers d'un banc de filtre polyphase à 10000 canaux. La bande traitée sera de quelques centaines de MHz. Un système dédié supervisera la détection des émetteurs et indiquera au réseau d'antennes les canaux inexploitable. Après masquage des dits canaux, le signal sera re-synthétisé et re-quantifié pour être transmis à l'imageur.

5. Conclusions

Que cela soit dans le choix des méthodes ou dans l'architecture des systèmes d'observation, force est de constater qu'il n'y a pas de solutions miracles. A plus long terme, il est clair que des projets d'instruments tels que FASR, LOFAR et SKA intégreront nombre de ces techniques, plus d'autres encore à développer.

Cependant, ces aspects techniques ne doivent pas faire oublier que l'action la plus efficace, lorsqu'elle aboutit, reste la régulation du spectre et l'attribution de bandes protégées à la radioastronomie.

Remerciements

Certains résultats évoqués dans cet article sont issus d'un travail collectif de Stephanie Bretteil, Andrée Coffre, Laurent Denis, Cédric Dumez-viou, Christian Fabrice, Eric Gérard, Guy Kenfack, Jean-Michel Martin, Philippe Ravier, Patrice Renaud, Philippe Picard, Emmanuel Thetas, Ivan Thomas, Philippe Zarka du *RFI mitigation group* [2] dont font partie également les auteurs et de Ludovic Bacquart de la société ALSE.

Références

- [1] GERARD E., "La radioastronomie face à la saturation du domaine hertzien", *La Vie des Sciences*, Comptes rendus, série générale, **tome 10, n°3**, 1993, 175-197.
- [2] NANCAY, *Site web*, Station de radioastronomie de Nançay : <http://obs-nancay.fr>.
- [3] CLERC V., "Implémentation de processus hétérogènes de traitement du signal en temps réel à contrainte moyenne. Application à la radioastronomie", *Thèse*, Paris 6, Février 2003.
- [4] SKA, *Site web*, Square Kilometer Array : <http://www.skatelescope.org>.
- [5] FRIDMAN P. A., BAAN W. A. "RFI mitigation methods in radio astronomy", *Astronomy and Astrophysic*, **378**, 2001, 327-344.
- [6] LESHEM A., VAN DER VEEN A-J., "Multichannel interference mitigation techniques in radio astronomy", *Astrophysical Journal Supplements*, **vol. 13, n°1**, Novembre 2000, 355-374.
- [7] LOFAR, *Site web*, Low Frequency Array : <http://www.lofar.org>.
- [8] WEBER R., AMIAUD L., COFFRE A., DENIS L., LECACHEUX A., ROSOLEN C., VIU C., ZARCA P. , "Digital implementation of a robust radio astronomical spectral analyser : towards IIIZW35 reconquest", à paraître dans les actes de *Eusipco'04*, Vienne, septembre 2004.
- [9] BARNBAUM C., BRADLEY R.F., "A new approach to interference excision in radio astronomy: real-time adaptive cancellation", *The Astronomical Journal*, **115**, Novembre 1998, 2598-2614.
- [10] ELLINGSON S.W. , BUNTON J. D., BELL J.F., "Removal of the GLONASS C/A signal from OH spectral line observations using a parametric modelling technique", *Astrophysical Journal Supplement*, **Vol. 135, No. 1**, Juillet 2001, 87-93.
- [11] FRIDMAN P.A., "RFI excision using a higher order statistics analysis of the power spectrum", *Astronomy & Astrophysics*, **368**, 2001, 369-376.
- [12] BRETTEIL S., WEBER R., "Comparison between two cyclostationary detectors for RFI mitigation in radio astronomy" à paraître dans les actes de *Eusipco'04*, Vienne, septembre 2004.
- [13] PICARD P., AUBRY D. , GERARD E., THOMAS I., "A short pulse blanker for wide band radio spectroscopy", *XXVII Assemblée générale de l'URSI*, Maastricht, Hollande, Août 2002.