



LES RADIOTELESCOPES DU FUTUR : TECHNOLOGIES ET AVANCÉES SCIENTIFIQUES

FAN : Étude d'antennes en réseau au foyer du Radiotélescope de Nançay.

FAN: Focal Plane Array Study at Nançay Radio Observatory

J.-M. Martin, J. Pezzani, C. Dumez-Viou**, R. Ansari***, C. Magneville, C. Yèche****, pour la collaboration FAN*

**Observatoire de Paris, GEPI, UMR8111, place Jules Janssen, F-92190 Meudon, France,*

jean-michel.martin@obspm.fr

***Observatoire de Paris, Unité Scientifique de Nançay, USR704, route de Souesmes, F-18330 Nançay, France*

jacques.pezzani@obs-nancay.fr; cedric.viou@obs-nancay.fr

****Université Paris-Sud, LAL, CNRS/IN2P3, UMR 8607, F-91898 Orsay Cedex, France, ansari@lal.in2p3.fr*

*****CEA, Centre d'Etudes de Saclay, DSM/IRFU, F-91191 Gif-sur-Yvette, France*

christophe.magneville@cea.fr; yeche@hep.saclay.cea.fr

Mots-clefs : Réseaux d'antennes au foyer, radiotélescope décimétrique de Nançay – Focal Plane Arrays, Nançay decimetric Radio Telescope

Résumé

Le NRT (Nançay Radio Telescope) est l'un des trois radiotélescopes "single-dish" de la classe des 100m dans le monde. De nouvelles techniques observationnelles ainsi que des besoins scientifiques nouveaux pour de grands relevés aveugles ont émergés ces dernières années, et doivent utiliser des grands champs de vue. En particulier, la technologie des réseaux d'antennes au foyer est au cœur des recherches et développements de préparation à SKA. Nous présentons le projet FAN (Focal Array at Nançay) qui consiste en l'étude et la réalisation d'un premier prototype d'antenne à réseau phasé installé au foyer du NRT, qui utilise une chaîne de réception et d'acquisition développée par les laboratoires LAL /IN2P3 et DSM/IRFU/CEA. L'antenne est utilisée pour des observations de test depuis la fin 2010. Le système FAN et son fonctionnement sont décrits, ainsi que la méthode de calibration et les premiers résultats obtenus.

1. Introduction et objectifs scientifiques

Le NRT (Nançay Radio Telescope) est l'un des trois radiotélescopes "single-dish" de la classe des 100m dans le monde. En pratique, c'est un instrument parfaitement adapté pour des suivis à long terme ou de grands relevés - ce qui le rend unique parmi ses pairs. De nouvelles techniques observationnelles ainsi que des besoins scientifiques nouveaux pour de grands relevés aveugles ont émergés ces dernières années, et doivent utiliser des grands champs de vue. En particulier, la technologie des réseaux d'antennes au foyer est au cœur des recherches et développements de préparation à SKA.

Le NRT a une combinaison unique de miroir sphérique et de foyer hors axe, avec un rapport F/D grand, unique aussi en radioastronomie. Ce qui signifie que ce télescope pourrait être équipé d'un récepteur focal à plusieurs lobes, basé sur une adaptation de l'état de l'art des techniques de réseaux phasés sur des antennes individuelles.

Le projet FAN (Focal Array at Nançay) a pour but de construire un prototype de réseau phasé adapté au Radiotélescope de Nançay et d'en évaluer les performances. Cette première étape est basée sur l'utilisation de 192 dipôles Vivaldi, développés à ASTRON dans le cadre du projet SKADS [1], d'amplificateurs à faible bruit développés à Nançay en technologie intégrée (ASIC) et d'un ensemble de voies de réceptions et d'acquisition sur PC développées au LAL/IN2P3 et au DSM/IRFU/CEA. L'ensemble du système est décrit dans le paragraphe 2. Les algorithmes de calibration, appliqués dans un premier temps en temps différé, sont en cours d'étude à Nançay et sont décrits dans le paragraphe 3.



LES RADIOTELESCOPES DU FUTUR : TECHNOLOGIES ET AVANCÉES SCIENTIFIQUES

1.1. Objectifs scientifiques

Les grands instruments de radioastronomie ont été progressivement équipés de systèmes multi-faisceaux, afin d'augmenter leur efficacité pour les observations systématiques (surveys). Bien que le NRT soit utilisé très efficacement pour les surveys pointés, pour l'observation de milliers de galaxies, de centaines d'étoiles, et le chronométrage de centaines de pulsars, certains programmes bénéficieraient d'un système multiplex (gain en rapidité, meilleure prise en compte des parasites radio) pour cartographier les sources étendues, et pour réaliser des surveys complémentaires de ceux en cours sur les autres grands instruments. Nous présentons ci-dessous un programme de survey systématique et deux programmes d'étude d'objets étendus qui sont particulièrement bien adaptés à la résolution spatiale du NRT :

BAO radio : Les groupes du LAL et du DSM ont étudié, en collaboration avec une équipe américaine, la possibilité de mise en évidence des oscillations baryoniques acoustiques (BAO) en utilisant la raie à 21cm de l'hydrogène. Il s'agit d'étudier l'énergie noire de l'Univers, à partir de la distribution à grande échelle des galaxies, et dans une première étape, de confirmer les détections faites à partir de deux surveys optiques 2dFGRS et SDSS en 2005 [2].

La mesure de l'émission de l'hydrogène d'un grand nombre de galaxies à des z de l'ordre de 0,5-1 demande une sensibilité que seul le SKA et ses précurseurs offriront. De plus, une résolution spatiale importante sera nécessaire pour s'affranchir des problèmes de confusion. Une approche alternative a été proposée dans le cadre du projet HSHS [3] et est détaillée dans cette conférence [4]. Dans cette méthode, les galaxies ne seront pas résolues, dans la mesure où une résolution spatiale de $\sim 10'$ est parfaitement adaptée à la mise en évidence de l'échelle caractéristique des BAO sur la répartition statistique des galaxies. Le NRT pourrait, avec un système focal équipé d'une centaine de faisceaux, permettre cette détection radio des BAO.

Cartographie de sources étendues stellaires et cométaires : à la fin de leur vie, la plupart des étoiles éjectent leur enveloppe sous la forme d'un vent, qui forme progressivement des coquilles de gaz et de poussière (les enveloppes circumstellaires). Grâce à ce mécanisme, les étoiles enrichissent le milieu interstellaire et contribuent ainsi au cycle cosmique de la matière. L'objectif principal est de comprendre les interactions entre les vents stellaires, détectables à 21cm avec le NRT, et le milieu ambiant. Les étoiles évoluées proches ont des enveloppes dont la taille apparente peut atteindre 2° , et la cartographie indispensable avec le lobe de $4' \times 22'$ (à déclinaison nulle) de l'émission de l'hydrogène est très coûteuse en temps d'observation, et justifie pleinement l'installation d'un système multi-faisceaux.

Les comètes permettent d'étudier les propriétés physiques de la nébuleuse protoplanétaire, dans la mesure où elles ont très peu évolué depuis la formation des planètes du Système Solaire. Leur composition chimique est étudiée grâce aux observations menées dans les domaines millimétrique à submillimétrique, et avec le NRT dans le domaine décimétrique. Pour améliorer notre compréhension de la physique des comètes, l'étude de la distribution spatiale de l'émission OH est un outil important, car il permet de détecter le *quenching* collisionnel dont l'effet doit être pris en compte le mieux possible [5], afin d'améliorer les estimations du taux de production de OH, et d'obtenir finalement l'information fondamentale du taux de production de l'eau de chaque comète. Les comètes sont des sources variables, donc il faut cartographier l'atmosphère à toutes les distances cométocentriques si possible simultanément, ce qu'un récepteur multi-faisceaux permettrait.

2. Description de l'antenne et du récepteur.

2.1. Réflecteurs

Le Radiotélescope Décimétrique de Nançay est constitué d'un réflecteur sphérique fixe d'axe Nord-Sud et de rayon 560 m, complété par un réflecteur plan mobile autour d'un axe Est-Ouest, dont le rôle est de permettre le pointage en déclinaison. L'ensemble se comporte pour une grande partie des déclinaisons utiles comme un réflecteur de dimensions $200 \text{ m} \times 34,56 \text{ m}$ et de distance focale 280 m.

Cette antenne très peu ouverte possède un rapport d'ouverture F/D de 1,4 dans le plan horizontal et de 8,1 dans le plan vertical. La conséquence la plus évidente en est que la répartition du champ au foyer est de grandes dimensions et la tache centrale couvre environ $2,5 \times 14 \times (\text{longueur d'onde})^2 \text{ m}^2$.

Depuis le milieu des années 1960, les antennes focales étaient des cornets de type hohorn, constituées d'un cylindre parabolique illuminé par un guide d'onde le long de la ligne focale, centrés autour des fréquences à observer et de largeur de bande limitée à 10%. Ces cornets sont remplacés depuis la fin des années 1990 par un système grégorien couvrant une large bande de 2 octaves et constitué de 2 réflecteurs conformés et de 2 cornets corrugués compacts.

Ces systèmes ne permettent d'observer que dans un seul faisceau. Un système multi-faisceaux peut être réalisé par plusieurs cornets, mais présente plusieurs désavantages dont celui de donner des lobes trop éloignés les uns des autres. La solution que nous souhaitons mettre en œuvre est d'échantillonner le champ au foyer par un réseau plan focal et de reconstruire les faisceaux en sommant les échantillons avec des poids convenables.

2.2. Antennes

La plus grande dimension de la tache focale, donc la taille du réseau, est proportionnelle à λ -max et le pas des antennes varie comme λ -min donc le nombre d'antennes élémentaires dans le réseau est proportionnel à $(\lambda$ -



LES RADIOTELESCOPES DU FUTUR : TECHNOLOGIES ET AVANCÉES SCIENTIFIQUES

$\max/\lambda\text{-min})^2$ avec $\lambda\text{-max}$ la longueur d'ondes correspondant à la fréquence la plus basse et $\lambda\text{-min}$ la longueur d'onde correspondant à la fréquence la plus élevée. Pour ce prototype la bande de fonctionnement choisie couvre 1250 MHz à 1500 MHz, incluant la raie 21cm de HI.

L'absence de lobes de réseau est assurée si le pas des antennes du réseau est inférieur à la longueur d'onde pour la direction normale au réseau et inférieur à la demi-longueur d'onde pour l'ensemble des directions. Les poids appliqués sur un réseau focal au foyer étant destinés à le faire viser selon sa normale de façon à illuminer correctement le réflecteur principal, on peut se contenter d'un pas compris entre $0,5 \lambda$ et λ . Une valeur de $0,7 \lambda$ à $0,8 \lambda$ est courante. Dans notre cas on prend un pas de $0,625 \lambda$ min soit 12,5cm.

Notre choix se porte sur des antennes de type Vivaldi qui ont été développées pour le prototype EMBRACE de réseau phasé pour SKA (Fig. 1). Nous ne les utilisons que dans une plage réduite de leur bande de fonctionnement qui va de 400MHz à 1600MHz.

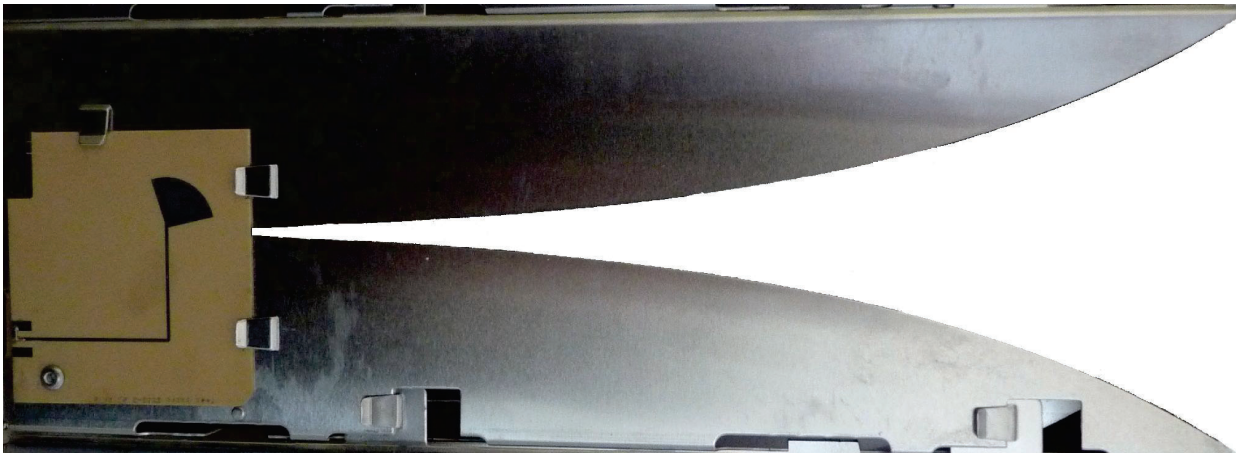


Fig. 1 : Antenne Vivaldi élémentaire.

A 21cm de longueur d'onde la tache focale fait environ 0,5m x 3m. La dimension du réseau est de 1m x 3m ce qui permet d'explorer le champ dans le plan horizontal et donne la possibilité de former des faisceaux à plusieurs endroits le long du réseau.

Ceci conduit donc à avoir 192 antennes élémentaires positionnées sur une grille à maille carrée, 8 dans le plan horizontal et 24 dans le plan vertical (Fig. 2 et 3). L'échantillonnage de la tache focale est ainsi beaucoup plus dense que dans le cas des antennes à petit rapport d'ouverture. En effet une antenne parabolique de type courant avec un $F/D=0.5$ a une dimension de tache focale de $\lambda/2$ ce qui est l'ordre de grandeur du pas du réseau. De façon à réduire le nombre de voies tout en réduisant le pas d'échantillonnage beaucoup trop serré dans la direction verticale, on somme en phase 4 antennes contiguës verticalement, ce qui donne 48 sorties indépendantes. La formation de faisceaux étant faite numériquement sur une bande de 250 MHz, nous réduisons pour ce prototype le nombre de voies d'un facteur 4 supplémentaire en sommant en phase 4 des blocs précédents. Chacun des étages de somme phasée est fait avec un écart type de 1,2 degré.

Le champ est donc échantillonné par 4 blocs d'antennes de 25cm dans le plan horizontal et 3 blocs d'antennes de 1m dans le plan vertical. Chaque bloc comprend 16 antennes élémentaires. La valeur optimale serait probablement proche de 15cm x 90cm.

Bien que le réseau comprenne des antennes dans les 2 polarisation horizontale et verticale, seule la polarisation horizontale est exploitée.

2.3. Partie RF (Radio-Fréquences)

Chaque antenne individuelle est équipée d'un amplificateur faible bruit de 1 dB de facteur de bruit. Cet amplificateur SiGe a été initialement développé pour SKA par le service de microélectronique de l'USN et fabriqué par NXP.

Comme l'antenne Vivaldi et l'amplificateur faible bruit ont du gain en dessous de la bande utile, un filtre passe bas coupant à 1100 MHz est inséré dans un amplificateur en sortie de chaque bloc de façon à filtrer les interférences basse fréquence (TV, GSM, ...)

Chacune des 12 voies de sortie des blocs d'antenne est ensuite ramenée dans la cabine blindée située en bas du chariot focal sur des chaînes hétérodynes à un changement de fréquence de façon à ramener le signal dans la bande 0-250 MHz d'entrée des ADC. Les signaux sont ramenés en numérique vers les PC d'acquisition sur disque situés dans le laboratoire hors-champ du NRT, par des fibres optiques monomodes (Fig. 4). Les composants de la chaîne de réception sont décrits par Ansari [4].

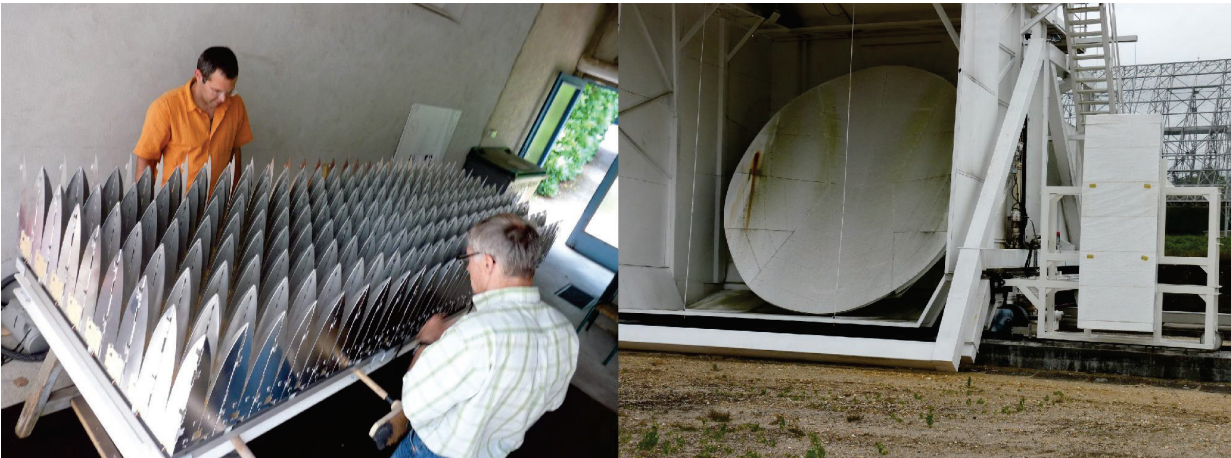


Fig. 2 (Gauche) : préparation du réseau de 192 antennes Vivaldi. (Droite) Le réseau installé sur son support, à côté du récepteur F.O.R.T. (Foyer Optimisé pour le RadioTélescope) [6]

3. Description des traitements

L'utilisation d'un PAF nécessite de connaître des calibrations à appliquer aux différentes voies avant d'effectuer les sommations de pixels nécessaires aux synthèses de faisceaux.

Une calibration w_f peut se déduire de matrices de corrélation \hat{R}_f et \hat{R}_n calculées sur les voies p du PAF :

$$w_f = f(\hat{R}_n, \hat{R}_f)$$

Le calcul d'une matrice de corrélation est un calcul lourd en mémoire et en nombre d'opérations, tandis que l'application d'une calibration pour effectuer la synthèse d'un faisceau f consiste simplement en une somme pondérée :

$$\hat{R} = \sum_{n=jL}^{(j+1)L-1} \mathbf{x}[n] \mathbf{x}^H[n], \text{ avec } \mathbf{x}[n] = [x_0[n], \dots, x_{p-1}[n]]$$

$$y_f[n] = w_f^H \mathbf{x}[n]$$

3.1. Acquisition

Afin de mettre aux points les traitements nécessaires à l'exploitation du PAF, les données de forme d'onde brutes issues des ADCs sont enregistrées. Le flux de données pour 12 voies échantillonnées en continu à 500 Mech/s sur 8 bits atteindrait 6 Go/s. Ce débit, inacceptable pour nos PCs d'acquisition, est réduit en diminuant le temps passé sur le ciel via un déclenchement périodique programmable de l'acquisition de 8192 échantillons sur les 12 voies simultanées.

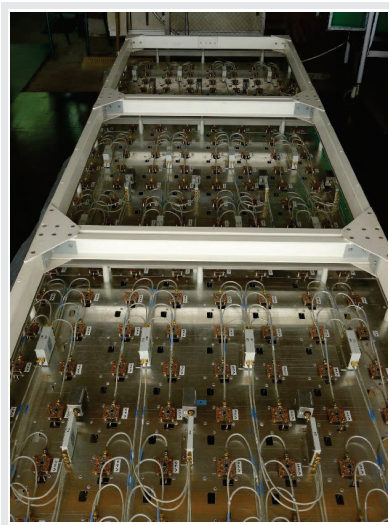


Fig. 3 : Amplificateurs et coupleurs Situés à l'arrière du réseau d'antennes Vivaldi.

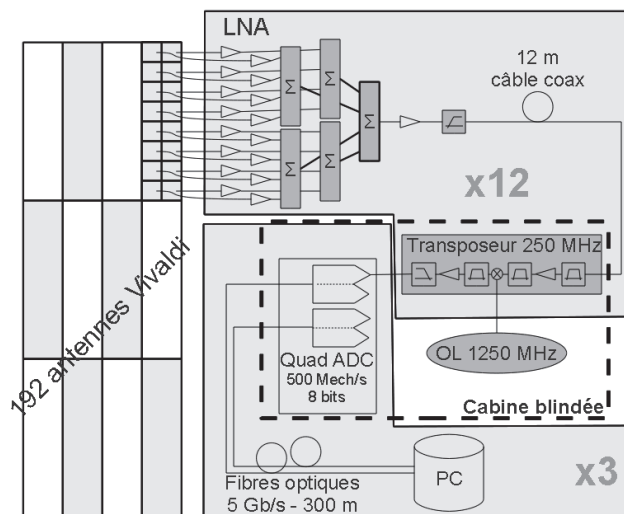


Fig. 4 : Schéma logique du système d'acquisition.



LES RADIOTELESCOPES DU FUTUR : TECHNOLOGIES ET AVANCÉES SCIENTIFIQUES

En pratique, une période de 1280 Hz offre un taux de couverture temporel de 2%, suffisant pour observer des sources intenses de calibration, et limite le débit de données à 125 Mo/s pour fournir des observations de calibration de 45 Go.

L'utilisation en exploitation de ce PAF ne pourra se satisfaire de ce mode de fonctionnement. Il est nécessaire de traiter les données au fil de l'eau afin de réduire les débits à des flux acceptables. Un synthétiseur de faisceaux numérique a été conçu par la collaboration pour appliquer en temps-réel aux signaux numérisés les poids complexes issus de la calibration. Le tout est de disposer de jeux de poids complexes adaptés aux observations.

3.2. Calibration

La procédure de calibration consiste en la réalisation d'observations astronomiques en mode transit sur les radiosources intenses « classique » telles que CasA, CygA et VirgA (voir Fig. 5).

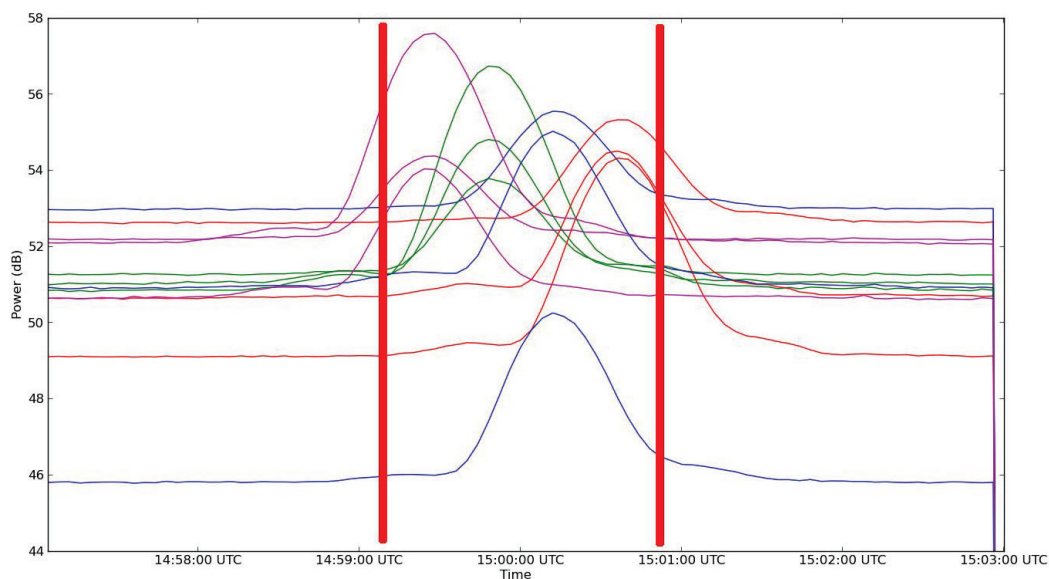


Figure 5: Évolution de la puissance dans la bande 1369-1371 MHz des 12 voies de FAN lors d'un transit sur CasA (20/01/2011). Les lignes rouges symbolisent les dimensions physiques de FAN. La courbe du bas est le symptôme d'une voie (T2P3) dans un état non-nominal.

Des matrices de corrélations sont estimées tout au long de l'observation et séparées en 2 groupes :

- les matrices \hat{R}_n estimées lorsque la radiosource n'était pas visible par FAN (bruit système seul).
- les matrices \hat{R}_f estimées aux positions où l'on souhaite synthétiser un faisceau.

Comme dans [7], en procédant à l'extraction de la solution dominante $\lambda_{\max}/\mathbf{u}_{\max}$ de la décomposition en valeurs propres généralisée de $\hat{R}_f \mathbf{u}_{\max} = \lambda_{\max} \hat{R}_n \mathbf{u}_{\max}$, on peut calculer le poids $\mathbf{w}_f = \hat{R}_n \mathbf{u}_{\max}$ qui maximise le rapport signal à bruit du réseau dans la direction de la source, c'est-à-dire à l'instant où a été calculé \hat{R}_f .

3.3. Synthèse de faisceaux

On peut mathématiquement calculer des poids pour synthétiser des faisceaux à toutes les positions que l'on souhaite mais, évidemment, seules les positions où de l'énergie est collectée par les voies seront finalement utilisables. La Fig. 6 présente les transits obtenus pour un grand nombre des faisceaux synthétisables avec FAN. La création de faisceaux en bordure de la tuile se révèle peu productive. La présence d'une voie endommagée (T2P3) n'oblitére pas les capacités de fonctionnement du réseau global mais altère la valeur du gain maximum accessible en cette position (t=15:00:10 UTC).

4. Conclusions et perspectives

Nous avons réussi les premières observations de radio sources brillantes, afin de réaliser une première calibration du calcul de formation de faisceau. Les étapes qui vont se dérouler pendant l'année 2011 concerneront essentiellement l'amélioration et la qualification du procédé de calibration, afin d'assurer de sa stabilité dans le temps, ce qui permettra

de faire des intégrations longues. Le but est de démontrer ensuite la capacité d'utiliser le démonstrateur FAN pour l'observation de radiosources faibles, en mode continu et en mode spectral et de comparer les performances du démonstrateur avec celles du récepteur cryogénique standard du NRT.

La validation de ces tests permettra de proposer l'étude et la réalisation d'un démonstrateur opérationnel, doté de 2 voies de polarisation linéaires, de performances (rendement, bruit de système) permettant d'envisager des observations radio-astronomiques, avec un petit nombre de lobes.

L'étape en cours permet aussi de valider la chaîne électronique de réception et d'acquisition ainsi que deux analyseurs développés respectivement au DSM (corrélateur/formateur de faisceau sur FPGA) et au LAL (corrélateur pouvant servir de formateur de faisceau basé sur une grappe de PC). Ces deux derniers analyseurs permettront l'observation en temps réel sur de longues périodes en évitant le stockage de quantités trop élevées de données (intégrations longues, plus grand nombre de sources observées).

Cette étude est une première étape pour l'étude d'un système multi-faisceaux adapté au NRT. Elle s'inscrit aussi dans le cadre de la préparation au projet SKA (Square Kilometre Array) : le projet PrepSKA [8], soutenu par le 7^{ième} programme cadre européen, comporte un volet sur l'étude de réseaux phasés au foyer d'antennes, dont le but est de maximiser l'efficacité du futur SKA [9].

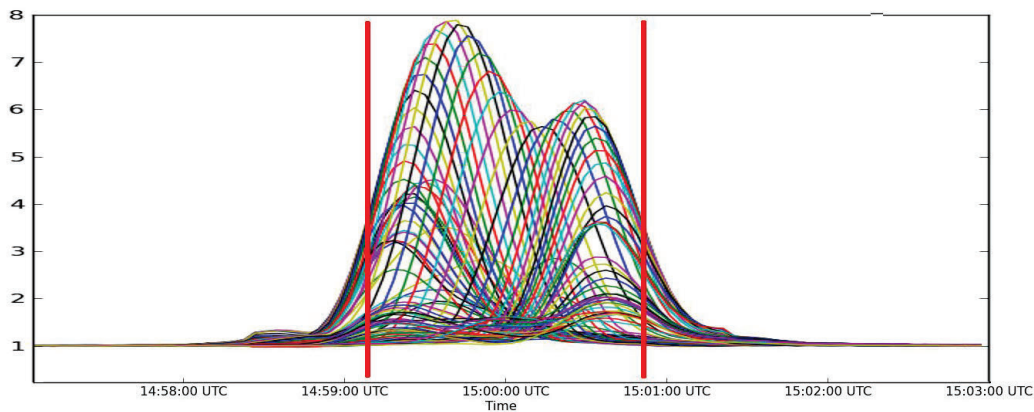


Figure 6 : Gain des faisceaux synthétisés. Les lignes rouges symbolisent les dimensions physiques de FAN.

Références bibliographiques

- [1] A. Faulkner et al., "Aperture Array for the SKA: the SKADS White Paper" <http://www.skads-eu.org/> (2010).
- [2] S. Cole et al., (the 2dFGRS Team), MNRAS 362, 505 (2005); D. J. Eisenstein et al., (the SDSS Collaboration), ApJ 633, 560 (2005).
- [3] J.B. Peterson, K. Bandura and U.L. Pen, "The Hubble Sphere Hydrogen Survey", astro-ph/0606104, Rencontres de Moriond, Contents and Structures of the Universe, (2006).
- [4] R. Ansari et al. "BAORadio: Cartographie 3D de la distribution de gaz HI dans l'univers". Cette conférence.
- [5] E. Gérard et al. "Observations of the OH radical in comet C/1996 B2 (Hyakutake) with the Nançay radio telescope" Planetary and Space Science, v. 46, p. 569-577 (1998).
- [6] C. Granet et al. "New dual-reflector feed system for the Nançay radio telescope" IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 45, p. 1366 (1997).
- [7] J. Landon et al., "PHASED ARRAY FEED CALIBRATION, BEAMFORMING, AND IMAGING," *The Astronomical Journal*, vol. 139, n°. 3, p. 1154-1167 (2010).



LES RADIOTELESCOPES DU FUTUR :
TECHNOLOGIES ET AVANCÉES SCIENTIFIQUES

[8] PrepSKA : <http://www.jb.man.ac.uk/prepska/wp2.html>

[9] P. E. Dewdney et al., "The Square Kilometre Array" *Proceedings of the IEEE*, Vol. 97, Issue 8, p 1482-1496 (2009).