

# Un réseau de paraboles à Nançay

## Préambule

La présente demande est soumise conjointement aux conseils scientifiques du LAL (version restreinte le 15 mars 2012) et de l'Observatoire de Paris (1 mars 2012). Elle s'inspire du projet élaboré par les mêmes équipes en réponse à l'appel d'offres P2IO qui n'a pas été retenu. Compte tenu des possibilités de financement au LAL et à l'Observatoire, la taille de l'instrument proposé a été réduite et les objectifs scientifiques recentrés sur l'évaluation détaillée de plusieurs options techniques s'inscrivant dans le plan de développement d'un grand réseau interférométrique permettant l'observation des oscillations acoustiques baryoniques (BAO) à 21 cm.

## I. Contexte scientifique et technique

### A. *L'énergie noire et les oscillations acoustiques baryoniques (BAO) en radio*

Les questions concernant la nature et les propriétés de l'énergie noire se trouvent au cœur de la cosmologie et de la physique aujourd'hui. L'énergie noire (EN) est une composante mystérieuse responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Les preuves de cette accélération se sont en effet accumulées au cours de la dernière décennie grâce aux observations des supernovæ de type Ia, des anisotropies du fond diffus cosmologique (CMB) et de l'étude de la structure à grande échelle de l'univers (LSS). Plusieurs sondes cosmologiques permettent de contraindre les propriétés de l'énergie noire ou son équation d'état : l'étude des supernovæ, des amas de galaxies, du cisaillement gravitationnel et de la structure à grande échelle de l'univers à travers les oscillations acoustiques baryoniques (BAO). Les oscillations acoustiques du plasma photons-baryons antérieures au découplage sont à l'origine des modulations du spectre de puissance de la distribution de matière, appelées BAO. Ces oscillations acoustiques ont clairement été mises en évidence dans les anisotropies du fond diffus. L'empreinte laissée par ces oscillations dans la distribution de matière a été également observée dans les relevés optiques des galaxies (SDSS, 2dFGRS...). La mesure de l'échelle de longueur des oscillations à différents redshifts constitue une sonde cosmologique de type « règle standard » et peut être utilisée pour contraindre l'équation d'état de l'énergie noire.

La distribution de matière dans l'univers peut bien sûr être observée en optique, en utilisant les galaxies comme traceur. L'observation radio de l'émission à 21 cm de l'hydrogène neutre est une méthode complémentaire pour déterminer la distribution de matière. U-L Pen et J. B. Peterson [1] ont proposé un projet radio en vue de cartographier la distribution de l'hydrogène atomique à travers son émission à 21 cm (transition hyperfine, 1.42 GHz à  $z=0$ ). Les positions angulaires des sources d'émission dans le ciel seront

déterminées par interférométrie radio, et le décalage vers le rouge (redshift) sera directement déduit de la fréquence de l'onde. Comparé au projet ambitieux en cours d'étude dans le consortium SKA [2], qui couvre de nombreux domaines de physique, l'instrument envisagé permettrait la cartographie de l'hydrogène atomique neutre jusqu'à  $z \sim 2-3$  avec une résolution angulaire de l'ordre de la dizaine de minutes d'arc. Il est optimisé pour la mesure des oscillations baryoniques et pourrait par ailleurs valider certains concepts de SKA.

Il est important de noter que la méthode d'observation envisagée ici repose sur la cartographie de l'émission totale à 21 cm en fonction du décalage vers le rouge, sans rechercher l'observation des sources individuelles (galaxies) [3]. Ceci constitue une des différences majeures avec les études menées pour SKA, ce qui se traduit par des spécifications instrumentales moins contraignantes. Des outils d'analyse de données et de simulation ont été développés en France dans le cadre du projet BAORadio. Ils ont été utilisés en particulier pour estimer la sensibilité des différentes configurations instrumentales pour la mesure de  $P(k)$  et de l'échelle acoustique en radio [4]. Il est également important de noter que la configuration des instruments précurseurs de SKA (ASKAP, MeerKAT) ne permet pas d'avoir une sensibilité suffisante pour la mesure du spectre de puissance aux échelles angulaires des oscillations baryoniques. La publication [6] présente ce point, ainsi que l'étude de soustraction des avant-plans (extraction du signal cosmologique), à travers une approche complémentaire de celle de la référence [4]. Notre projet, beaucoup moins ambitieux que SKA, pourrait se concrétiser assez rapidement (4-5 ans) et permettrait alors de valider certains concepts utilisés dans SKA. Au sein d'un groupe comprenant des scientifiques américains (Univ. Carnegie Mellon à Pittsburgh, Univ. Wisconsin, Fermilab), canadiens (CITA, Toronto), et Chinois (NAOC), nous tentons de constituer une collaboration pour construire un instrument radio pour un relevé cosmologique à 21 cm, couvrant le domaine en décalage vers le rouge  $0.3 \leq z \leq 2.5$  sur un site approprié en Chine.

## **B. BAORadio et FAN**

Pour valider le concept d'interféromètre radio avec des réflecteurs cylindriques, un prototype (CRT-P) a été construit à Pittsburgh sur un site à quelques km du campus de l'université Carnegie Mellon. Il comprend 2 petits réflecteurs cylindriques de 25m de long et 10m de large. La conception et la construction mécanique, l'électronique et le concept d'interférométrie par la technique de FFT spatiale ont été partiellement évalués et validés sur ce prototype. En plus de ces validations techniques, le prototype a permis d'effectuer des observations astronomiques à basse résolution angulaire ( $\sim 0.5-1^\circ$ ). Les réflecteurs cylindriques ne constituent pas la seule configuration instrumentale envisagée. En effet, un interféromètre constitué d'une centaine de paraboles de petite dimension (3 à 7 mètres de diamètre) [6] permettrait également d'atteindre la sensibilité nécessaire. Depuis la fin 2010, nous travaillons sur un prototype d'interféromètre utilisant des petites paraboles ( $D=3$  ou 5 mètres) pour évaluer les performances d'un instrument de ce type pour un relevé cosmologique à 21 cm.

Le projet de R&D initié par le LAL (CNRS/IN2P3) et l'IRFU/SPP (CEA) a abouti au développement de la chaîne électronique et informatique BAORadio, adaptée aux interféromètres radio dans le domaine du GHz. Cette chaîne comprend des modules de conditionnement analogique du signal, des modules de numérisation et de filtrage numérique,

des cartes de réception de données au standard PCI-Express, ainsi que des modules de calcul de corrélation et de la FFT spatiale. La mise au point des éléments de la chaîne a été effectuée en collaboration avec les équipes de l'observatoire de Nançay-Meudon depuis fin 2007. Des tests ont été réalisés auprès du radiotélescope de Nançay, en parallèle et de manière complémentaire aux tests de Pittsburgh. Cette chaîne électronique équipe également FAN, un prototype de réseau phasé pour le plan focal du NRT. Le projet FAN (Focal Array for the NRT) est un projet de R&D, visant à caractériser un système multilobes, constitué d'antennes élémentaires en réseau, au foyer d'un radiotélescope à grand rapport  $F/D$ . Le prototype FAN, actuellement installé sur le chariot mobile du NRT, est composé d'un plan de récepteurs de 3m de haut et de 1m de large, correspondant à la taille de la tache focale au foyer primaire du NRT. Outre la chaîne électronique, FAN utilise également le corrélateur logiciel développé pour le projet BAORadio et a permis de tester un corrélateur FPGA avec des observations de sources radio.

Le projet BAORadio et FAN ont été soutenu par le LAL, l'Irfu, l'Observatoire de Paris (et ses laboratoires à Meudon et Nançay), le CNRS (PNC/PNCG Programme National Cosmologie et Galaxies, le Programme AstroParticules et P&U) et le GIS P2I (Physique des deux Infinis) depuis 2007. Les développements techniques ont été menés à un rythme soutenu grâce aux moyens mobilisés et la compétence des équipes impliquées. Un système complexe et performant de numérisation, d'acquisition et de traitement des signaux radio a ainsi pu être conçu et réalisé dans les quatre dernières années. Des outils de simulation et d'analyse, orientés en particulier vers les BAO en radio ont aussi été développés. Ce savoir-faire constitue également un atout pour la participation française au projet SKA et à ses précurseurs.

## II. Chaîne électronique et informatique BAORadio

L'originalité du système électronique développé réside dans sa conception entièrement numérique, et dans l'utilisation de circuits câblés à base de FPGA afin d'obtenir une puissance de traitement importante, avec un coût et une consommation modérés. La conception de ce système s'approche de celle de la banque de composants CASPER [10], développées à Berkeley aux Etats-Unis, ou de l'initiative de RadioNet en Europe, avec le développement de la carte UNIBOARD [11]. La gamme de fréquence 0.5-1.5 GHz est découpée en plusieurs bandes de ~250 MHz de large, et le signal analogique provenant des récepteurs est numérisé à 500 MHz, après une étape d'amplification et de filtrage, et un décalage de fréquence. Ce flot numérique est ensuite traité par les différents étages de la chaîne électronique et d'acquisition. Des éléments de cette chaîne et le système d'acquisition ont été conçus et réalisés durant les années 2007 à 2009. Outre des tests de mise au point en laboratoire, le programme de qualification comprenait des tests effectués en situation réelle auprès du radiotélescope de Nançay et auprès du prototype de réflecteurs cylindrique de Pittsburgh.

1- Module analogique (**AEM**) d'amplification, de filtrage et de décalage en fréquence. Ces modules, conçus et réalisés par l'IRFU, permettent le découpage du signal en bande de 250 MHz.

2- Système de distribution d'horloge et de signaux de synchronisation (**DCLK**). Celui-ci, également sous la responsabilité de l'IRFU, permet d'assurer le synchronisme temporel avec un jitter de +/- 30ps.

3- Une carte de numérisation à 4 voies (**DIGFFT**), capable de numériser les signaux à 500 MHz, a été conçue et réalisée par le LAL. Cette carte est équipée de circuits programmables puissants, capables d'effectuer au vol le filtrage numérique des signaux pour les séparer en composantes quasi-monochromatiques (FFT). Les données brutes ou après filtrage (FFT) sont transmises par des liens optiques haut débit (~ 5 Gbits/s) vers les ordinateurs d'acquisition, ou vers un système dédié de corrélateur et de reconstruction de lobe. Le code embarqué (firmware) de filtrage numérique est réalisé par l'IRFU et le LAL.

4- Un module de réception des données (**PDR**), à la norme PCI-Express, capable de soutenir des débits de plusieurs centaines de méga-octets/s, permet le transfert des données vers la mémoire des ordinateurs d'acquisition. Le code embarqué de ce module est également développé au LAL.

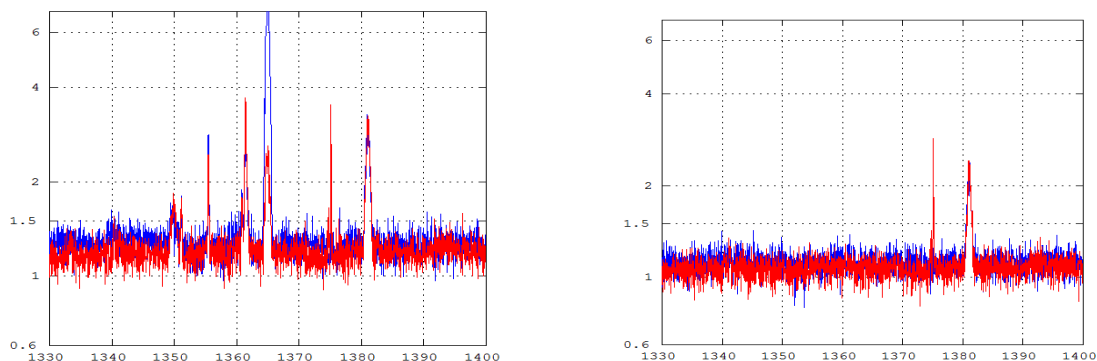
5- Un système d'acquisition et de traitement au vol des données sur des grappes de PC a été développé sous la responsabilité du LAL, en collaboration avec l'IRFU. Un corrélateur logiciel, capable de traiter au vol le flot des données provenant des cartes DIGFFT a été mis au point en 2010. Ce système a été utilisé avec succès à Pittsburgh fin 2010 et a été déployé à Nançay pour le prototype FAN depuis l'été 2011.

### III. Qualification et déploiement du système

Les premiers tests de la chaîne électronique ont été effectués à Nançay au foyer du radiotélescope décimétrique (NRT) en juillet 2008. D'autres campagnes de tests ont été menées durant l'hiver et le printemps 2009 à Nançay, ainsi qu'une première campagne d'observations sur le prototype de réflecteur cylindrique de Pittsburgh en Juin 2009. Deux autres campagnes d'observations en mode interférométrique ont été menées à Pittsburgh fin Novembre 2009 et en Décembre 2010.

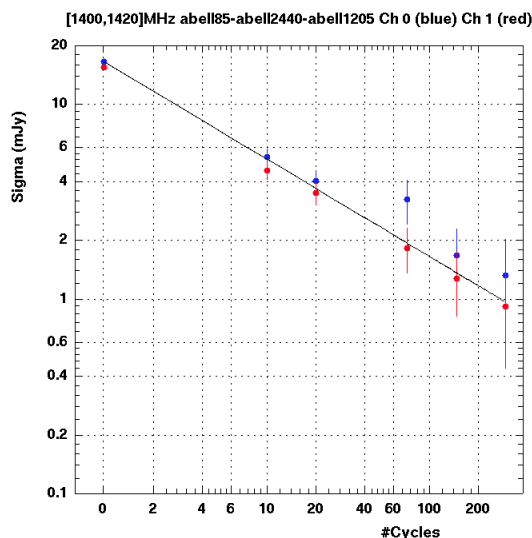
#### A. Observations HICI (Amas à Nançay)

Nous menons actuellement à Nançay un programme d'observation en vue de la recherche d'émission HI dans des amas proches ( $z < 0.12$ ) tels que Abell 85, Abell 168, Abell 1225, Abell 2440. Depuis fin 2010, deux polarisations orthogonales du récepteur cryogénique du NRT sont instrumentées à la fois par le système de lecture « standard » et par la chaîne d'électronique BAORadio.



**Figure 2** Illustration de la réduction des bruits radios intermittents (RFI) sur la bande de fréquence [1330,1400] MHz. A gauche, des spectres issus d'une moyenne sur 2.5 millions de trames enregistrées (~80 sec de données), à droite les mêmes données après l'application d'une filtre médian temporel sur des lots de 25,000 trames. Il ne reste que des bruits permanents sur une échelle de temps de l'ordre de 3sec. Les deux polarisations sont différenciées par la couleur.

Les observations de routine sont effectuées de mars à octobre 2011 et nous avons accumulé plus de 140 TeraBytes de données, correspondant à environ 65h d'observations brutes. Les données sont archivées au Centre de Calcul de l'IN2P3 à Lyon. L'analyse est en cours avec



**Figure 1** Evolution de la sensibilité dans la bande [1400, 1420] MHz en fonction du nombre de cycles analysés correspondant chacun à une exposition de 10 secondes par cycle de 2 minutes. Les données de 50h de temps de radiotélescope étalées sur 6 mois (Abell85, Abell1205 et Abell2440) ont été rassemblées. Les deux polarisations sont différenciées par la couleur. La courbe en  $1/\sqrt{(\#cycles)}$  permet de guider l'œil et sa décroissance est conforme à l'amélioration attendue de la sensibilité avec le temps de pose.

comme premier objectif le nettoyage de la bande de fréquence 1250-1500 MHz des pollutions radio-fréquences (RFI), et ensuite la détermination de la sensibilité de l'ensemble. Les « images » temps-fréquence sont analysées par des techniques de filtrage statistique pour éliminer certaines RFIs sur la bande de 250MHz. La illustre le type de réduction de RFI que

l'on peut obtenir. On peut apprécier que la plupart des signaux parasites d'origine radio terrestre présents dans la bande 1330-1400 MHz sont éliminés, et qu'il ne subsiste que les bruits permanents (radio ou électronique). La mise en application de méthodes similaires, appliquées à la lecture standard du corrélateur du NRT, a montré que la réduction des RFI est grandement améliorée (de plusieurs ordres de grandeur) grâce à la résolution temporelle de notre chaîne d'acquisition, combinée à la résolution en fréquence et à la grande dynamique de numérisation (8 bits). Les données acquises permettent d'étudier avec une précision jusqu'à présent inégalée la stabilité du récepteur du NRT et les modes de calibration adaptés au projet.

L'évolution statistique de la sensibilité en fonction du temps d'intégration a bien été observée comme le montre la . Des observations de sources telles que 3C161 ont permis de procéder à un étalonnage préliminaire de nos échelles de puissance.



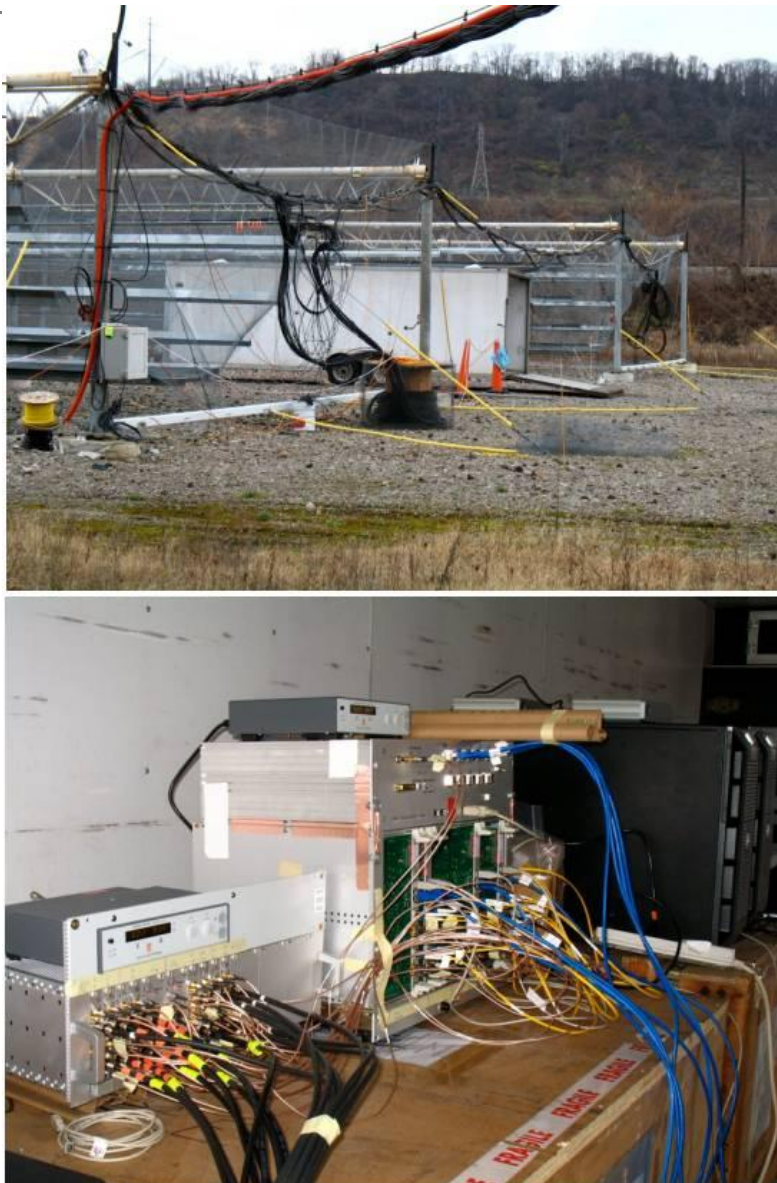


Figure 3 Photographies prises lors de la campagne d'observation de Novembre 2009 à Pittsburgh. Les réflecteurs cylindriques et la caravane abritant l'électronique d'acquisition sont visibles sur la photo du haut, en bas l'électronique BAORadio.

### ***B. Observations en modes interférométrique et calibration***

Une campagne d'observation en mode interférométrique avec 16 voies de numérisation a été menée à Pittsburgh en novembre 2009 (). La décomposition en composantes de Fourier (FFT) était effectuée par les FPGA, sur les cartes DIGFFT, et les coefficients de Fourier stockés sur disque et les visibilités ont été ensuite calculés en différé. L'analyse des données de visibilités début 2010 a permis la mise au point d'une procédure d'intercalibration des voies et la synthèse de lobe à deux dimensions (). En décembre 2010, une nouvelle campagne d'observations à Pittsburgh a été effectuée avec 32 canaux, avec numérisation et FFT effectuées par les cartes DIGFFT (cf. ci-dessus) couplées à un corrélateur logiciel constitué de

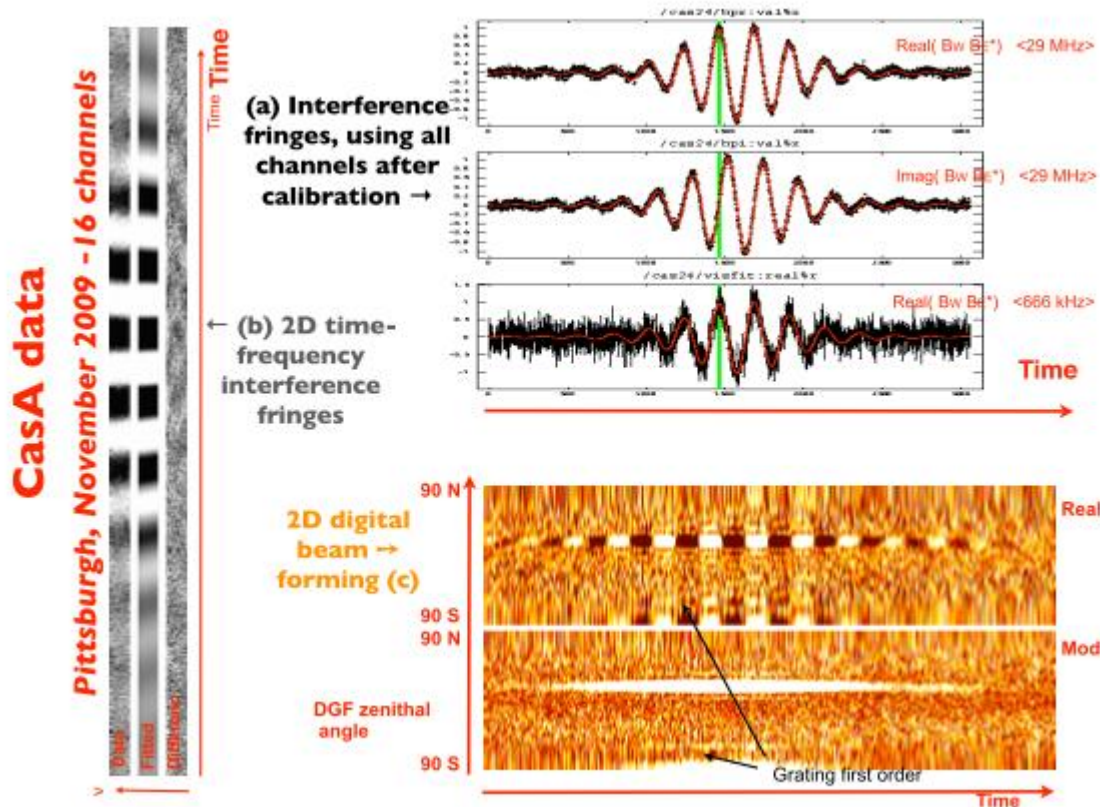


Figure 4 Signaux d'interférence et synthèse de lobe, Observations en mode interférométrique avec le prototype de réflecteur cylindrique de CMU à Pittsburgh en Novembre 2009.

8 PCs interconnectés. Tout a parfaitement fonctionné du point de vue de l'électronique BAORadio et des logiciels de calcul au vol des visibilité (corrélateur software), mais les observations ont été marquées par de nombreuses interventions sur la câblerie et l'électronique de proximité des dipôles. Ces problèmes et la dégradation du réflecteur cylindrique suite à une rupture due à une tempête de neige en 2010 nous ont empêchés d'atteindre le gain de sensibilité escompté par rapport à la précédente campagne de mesures en novembre 2009. Les premiers tests des méthodes de calibration ont été réalisés début 2010 sur les données issues des observations de décembre 2009 à Pittsburgh. La calibration des antennes a été réalisée en utilisant les visibilité des transits des sources brillantes. La position du système de franges détermine l'alignement ou le calage en temps des divers récepteurs (cf .a). L'évolution de la position des franges en fonction de la fréquence (.b) permet de corriger les variations de phases de la chaîne électronique (réponses chromatique des étages d'amplification et de filtrages). La connaissance de l'indice spectral des sources brillantes permet ensuite de mesurer les gains et leur variation en fréquence. Après calibration en phase et en gain des antennes, les visibilité sont combinées numériquement pour former des lobes. Ces lobes correspondent à différents éléments de résolution à l'intérieur du lobe principal du réflecteur (.c).

L'interféromètre de test proposé nous permettra d'étudier précisément la procédure de calibration à appliquer, de déterminer la fréquence des calibrations (stabilité de



l'électronique...) et de mesurer les éventuelles corrélations du bruit entre les antennes. La réalisation de cet interféromètre à Nançay permettra une étude systématique des divers effets, étude qu'il est très difficile de mener à Pittsburgh (temps de mesure limité, configuration des dipôles...). Cette étude devra également déterminer s'il est nécessaire de compléter ces calibrations par des dispositifs électroniques spécifiques pour permettre des corrections fines entre deux calibrations sur des sources.

#### IV. Proposition d'installation d'un interféromètre à Nançay

Nous proposons d'installer à Nançay un petit réseau interférométrique constitué de paraboles de petite taille. Ceci peut être vu comme une étude de la viabilité d'un interféromètre grand champ utilisant un grand nombre (quelques centaines) de « petites paraboles » pour un relevé cosmologique à 21 cm. Une étude d'impact radio-électrique devra être menée, en lien avec les possibilités d'implantation.

##### A. Description de l'appareillage

Le système comporterait des paraboles de type « parabole de télévision » de 4.5 mètres de diamètre ou de 3 mètres selon disponibilité. Le réseau aurait une surface totale  $A$  de plus de 60 m<sup>2</sup> avec 4 paraboles. Un réseau « dense » de 4 paraboles de 4.5 mètres de diamètre aurait un champ de vue instantané FOV  $\approx 4.7^\circ \times 4.7^\circ$  et une résolution typique de  $\sim 2.7^\circ$  à  $\lambda = 0.3$  mètre ( $z = 0.5$ ) ; en allongeant la ligne de base pour atteindre une distance entre récepteurs de  $2 \times 4.5$ m on atteindrait une résolution de  $\sim 1.3^\circ$ .

Les paraboles seront orientables avec des montures motorisées sur 2 axes pour pouvoir positionner le réseau à distance ce qui permet une utilisation permanente de l'installation, et permettre des observations avec suivi de sources. Diverses configurations de réflecteurs devront être envisagées suivant les modes de fixation au sol en cours d'étude.

Nous disposons actuellement de quelques réflecteurs paraboliques de fabrication chinoise de diamètre  $D = 3.5$  m, ainsi que de deux réflecteurs de meilleure qualité de fabrication hollandaise RF HAMDesign de diamètre  $D = 3$ m (). Des études pour la motorisation (monture) et l'équipement électronique (cornet récepteur au foyer) de ces paraboles ont été menées au LAL et à Nançay-Meudon. Le dispositif est en cours d'opération sur un site du LAL (Figure 5). Deux récepteurs (cornets) sont en cours de fabrication sous la supervision de Nançay-Meudon.

Nous disposons à proximité du LAL d'un accès sécurisé à un emplacement permettant d'effectuer une première série de tests basiques. Les deux paraboles actuellement testées au LAL seront ensuite installées à Nançay à l'été 2012 en attente du système proposé dans ce document. Des mesures interférométriques préliminaires permettront de mesurer le niveau de bruit ( $T_{\text{sys}}$  ou température système), ainsi que le lobe d'antenne formé par l'ensemble réflecteur-cornet.



Figure 5 A gauche : réflecteur de 3.5m de diamètre d'origine chinoise monté sur un pied et une monture conçus et réalisés au LAL. A droite : réflecteur de 3m de diamètre de la firme hollandaise RF HAMDesign.

Les objectifs techniques et scientifiques du projet de réseau de 4 réflecteurs sont:

- Amélioration des algorithmes de nettoyage des RFI en bande large (250 MHz),
- Validation de la modélisation du bruit,
- Amélioration et validation des méthodes de calibration du gain et de la phase des récepteurs,
- Aide au choix des récepteurs (feeds),
- Mise au point des programmes d'analyse des visibilitées pour reconstruire les cartes du ciel.

Si nous pouvions augmenter le nombre de paraboles pour obtenir une surface de l'ordre de 110m<sup>2</sup>, c'est-à-dire avec 7 à 8 paraboles de 4.5 m de diamètre, soit le double de la présente proposition, alors il serait concevable de procéder à une observation du ciel en mode transit (drift-scan) avec des observations de plusieurs semaines voire plusieurs mois, afin d'atteindre un niveau de sensibilité de quelques mK par élément de résolution. La Figure 6 montre la sensibilité attendue, en termes de spectre de bruit instrumental, comparé au spectre des fluctuations de température d'émission à 21 cm. Un petit réseau interférométrique pourrait atteindre la sensibilité nécessaire pour mettre en évidence la corrélation de l'émission à 21 cm avec la distribution de matière observée par les relevés optiques dans un domaine en décalage vers le rouge  $0.3 \leq z \leq 0.5$ .

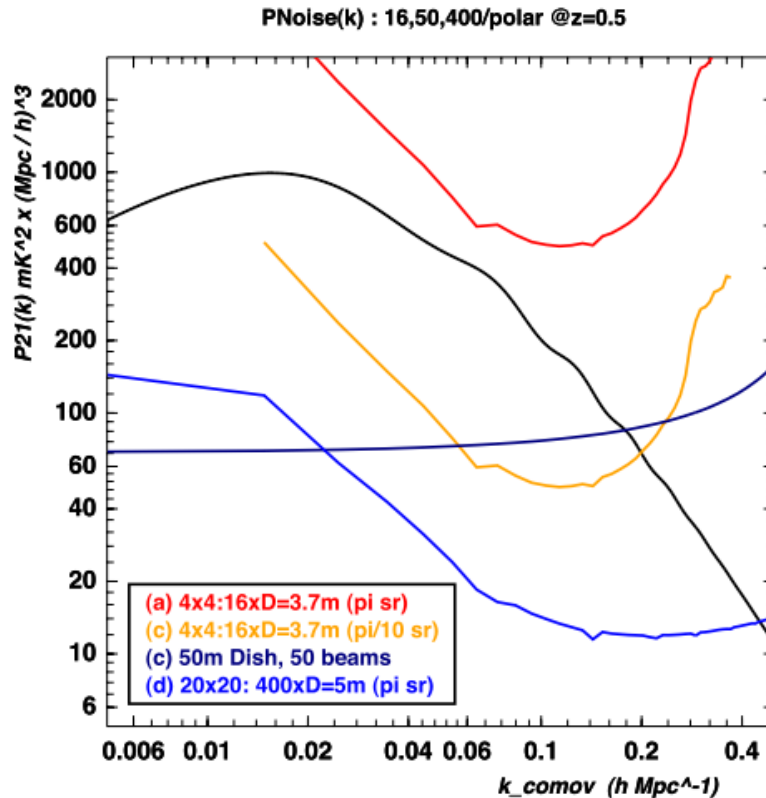


Figure 6 : Spectre  $P(k)$  des inhomogénéités de température de brillance à 21 cm à  $z=0.5$  (en noir) et spectre de bruit instrumental attendu ( $T_{sys}$ ), pour divers instruments équipés de détecteurs de  $T_{sys} = 50K$ , pour une couverture de  $1/4$  du ciel soit  $10\,000 \text{ deg}^2$  (sauf mention du contraire) pendant 1 an.

- Interféromètre avec un réseau de 16 paraboles (rouge),
- Le même interféromètre mais observant un champ réduit ( $1000 \text{ deg}^2$  en 1 an) (orange),
- Un interféromètre composé de 400 paraboles (bleu clair),
- Une seule parabole de grand diamètre  $D=50m$ , et instrumentée pour acquérir 50 pointés à la fois (bleu foncé).

Après l'utilisation scientifique de ce mini-interféromètre, il est envisageable de le pérenniser à des fins pédagogiques au même titre que l'installation d'une antenne de type [SALSA](#) sur les sites de la station de radioastronomie de l'Observatoire de Paris, de Nançay, de Bordeaux et de Pleumeur-Bodou. Cette infrastructure serait accessible à distance à l'usage d'universités partenaires par exemple.

## B. Budget

Nous disposons de tous les modules électroniques (électronique analogique, cartes de numérisation, cartes de réception) pour équiper 32 voies (2 polarisations jusqu'à 16 réflecteur-récepteur). Le budget demandé devrait permettre de couvrir le coût d'achat des réflecteurs (fournisseur industriel), les travaux pour la préparation du site (plots béton, terrassement), la fabrication des récepteurs (cornets), ainsi que la grappe de PCs pour l'acquisition et le traitement au vol des données (calcul des visibilitées).

L'estimation des coûts est basée sur les prix des fournisseurs, ou sur des réalisations déjà effectuées pour le système de test avec des paraboles. Il y a néanmoins une incertitude plus grande sur le coût des travaux de préparation du site (terrassement, béton ...).

Item	Prix unitaire	Nombre	Prix	Source Fin.
Paraboles(D=4.5m)	2,250 €	4	9,000 €	LAL
Motorisation	1,470 €	4	5,880 €	LAL
Puissance	320 €	4	1,280 €	LAL
Support+béton	8,129 €	1	8,129 €	OBS. PARIS
Feed (mécanique)	311 €	4	1,244 €	OBS. PARIS
Interface Feed-Parabole	800 €	4	3,200 €	OBS. PARIS
Electronique	1,500 €	4	6,000 €	LAL&IRFU
Fibres, Ethernet, câblerie...			2,000 €	LAL
PCs	2,500 €	2	5,000 €	LAL
Total			41,733 €	

La répartition de la demande est donc la suivante: 26.2k€ LAL, 12.6k€ Obs.de Paris, 5k€ Irfu.

### ***C. Planning***

- A partir du feu vert (Printemps 2012) : étude, commandes et réalisation des éléments des 4 paraboles définitives
- Été 2012 : Déploiement et exploitation de système de test avec les deux paraboles actuellement en test au LAL, mesure du niveau de bruit, du bruit corrélé et du lobe d'antenne pour un réflecteur et son cornet.
- Printemps 2013 : Déploiement de l'ensemble des 4 paraboles commandées, mise au point des logiciels d'analyse des données.
- Printemps 2013 – Printemps 2014 : exploitation, observation du Ciel. Une amélioration du firmware FFT de la carte DIGFFT, associée à une nouvelle version du corrélateur logiciel, tirant parti de la puissance de calcul des GPU est envisageable afin d'améliorer le cycle utile du système sur le ciel.

**D. Membres du projet**

NOM	Prénom	Laboratoire	Fonction	% du temps consacré au projet
Martin	Jean-Michel	GEPI	ast. adj, coI Meudon, tests, lien/ méca USN, GEPI	30
Mei	Simona	GEPI	Professeur, cosmologie	10
Rigaud	François	GEPI	Resp. mécanique projeteur, supports antennes, implantation, cornets focaux.	20
Colom	Pierre	LESIA	ast-adj, radioastronomie, tests	10
Pezzani	Jacques	USN	ingénieur, antennes	10
Viou	Cédric	USN	ingénieur, traitement du signal, acquisition digit.	10
Garnier	Samuel	USN	ingénieur, implantation logistique	10
Torchinsky	Steve	USN	ingénieur, suivi, lien avec SKA	5
Ansari	Réza	LAL	prof., PI, & coI coll. internationale, tests, logiciels/corrélateur	50
Campagne	Jean-Eric	LAL	chercheur, coI, tests, analyse des données (et données prog. HIcluster)	60
Moniez	Marc	LAL	chercheur, Resp. interféromètre prototype actuel.	30
Torrento	Ana-Sofia	LAL	Postdoc P2I (LAL, lien/GEPI), analyse des données (actuellement sur programme HIcluster)	>50 selon évol. du prog. HIcluster
Charlet	Daniel	LAL	ingénieur, acq. digitale	30
Mansoux	Bruno	LAL	ingénieur, informatique	5
Pailler	Claude	LAL	ingénieur, informatique	30



Taurigna	Monique	LAL	ingénieur, informatique	30
Marie	Rodolphe	LAL	dessinateur-projeteur, assistance à F.Rigaud	10
Cornebise	Patrick	LAL	Ingénieur, câbleur	10
Wicek	François	LAL	Ingénieur, contrôle- comande	20
Abbon	Philippe	SPP	ingénieur, récepteurs	15
Yèche	Christophe	SPP	Chercheur	10
Magneville	Christophe	SPP	Chercheur, BAO, traitement données interféromètres	25

## V. Références

- [1] Peterson J.B., K. Bandura and U.L. Pen, astro-ph/0606104, (2006)
- [2] F. B. Abdalla, S. Rawlings, MNRAS 360, 27 (2005), voir aussi le site web de SKA à <http://www.skatelescope.org/>.
- [3] Tzu-Ching Chang, Ue-Li Pen, J.P. Peterson, P. McDonald PRL, 100 091303 (2008).
- [4] R. Ansari, J.-M. Le Goff, Ch. Magneville, M. Moniez, N. Palanque-Delabrouille, J. Rich, V. Ruhlmann-Kleider and Ch. Yèche, ArXiv:0807.3614 (2008).
- [5] R&D at Nançay for radio astronomy detectors and systems, S. Bosse et al., Astrophysics Detector Workshop 2008 P. Kern (ed) EAS Publications Series, 37 (2009) 127-134
- [6] R. Ansari, J.E. Campagne, P.Colom, J.M. Le Goff, C. Magneville, J.M. Martin, M. Moniez, J.Rich, and C.Yèche, 21 cm observation of LSS at  $z \sim 1$  Instrument sensitivity and foreground subtraction, soumis à A&A, 2011, arXiv:1108.1474
- [7] R. Ansari, J.E. Campagne, P.Colom, C. Magneville, J.M. Martin, M. Moniez, J.Rich, and C.Yèche, BAORadio : Cartographie 3D de la distribution de gaz H<sub>2</sub> dans l'Univers Contribution aux Journées URSI 29-30 mars 2011, Paris et "BAORadio: A digital pipeline for radio interferometry and 21cm mapping of large scale structures" Comptes-rendus de l'Académie des Sciences janvier-février 2012, T13, p46. Version abrégée en français arXiv:1106.5659
- [8] J. Landon et al., « PHASED ARRAY FEED CALIBRATION, BEAMFORMING, AND IMAGING », The Astronomical Journal, vol. 139, no. 3, p. 1154-1167, 2010.
- [9] Section Generalised EVD, P. Common & C. Jutten, Peyresq Summer School, July 2011
- [10] Center for Astronomy Signal Processing and Electronics Research web site <http://casper.berkeley.edu/>
- [11] Advanced Radio Astronomy in Europe (RadioNet) Uniboard <http://www.radionet-eu.org/uniboard>
- [12] D. Charlet et al. 2011, IEEE Transactions on Nuclear Science, 58, 4, 1833