

BAORadio et Tianlai : la cosmologie et les BAO's à 21 cm

Rapport soumis au conseil scientifique de l'IN2P3

R. Ansari, J.E.Campagne, M. Moniez
LAL, Univ. Paris-Sud , CNRS/IN2P3

M. Bucher, K. Ganga
APC, Univ. Paris-Diderot, CNRS/IN2P3

C. Magneville, C. Yèche
Irfu-SPP , CEA

P. Colom, J.M. Martin, S. Torchinsky
Observatoire de Paris, CNRS/INSU

19 octobre 2015

Table des matières

1 Objectifs scientifiques	2
1.1 Les BAO's à 21 cm	2
1.2 Contexte national et international	3
1.3 SKA et LOFAR/NenuFAR	5
2 Projet BAORadio	6
2.1 présentation générale	6
2.2 La chaîne électronique BAORadio	7
2.3 Tests et observations à Pittsburgh	8
2.4 Programme HICluster	9
3 BAORadio : projets en cours	9
3.1 PAON-4	9
3.2 NEBuLA	10
3.3 Tianlai	11

Préambule

Ce document décrit les études et réalisations accomplies dans le cadre du projet BAORadio depuis 2007 par le LAL, en collaboration avec l'Irfu-SPP (CEA) et l'Observatoire de Paris. La première section décrit l'objectif scientifique du projet, ainsi que le contexte international. La seconde section donne un aperçu chronologique des activités BAORadio et la troisième section présente de manière plus détaillée les projets en cours : Exploitation de l'interféromètre PAON-4, le développement de la carte NEBuLA et la participation au projet Tianlai. Ce document reprend en grande partie des éléments présentés dans le rapport présenté au Conseil Scientifique du LAL (16 septembre 2015) et la proposition soumise au PNCG (Programme National Cosmologie et Galaxies) en septembre 2015.

1 Objectifs scientifiques

1.1 Les BAO's à 21 cm

Les questions concernant la nature et les propriétés de l'énergie noire se trouvent au coeur 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 [1, 2]. 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. Néanmoins, compte tenu des faibles intensités d'émission radio, comparées aux émissions optiques, la détection de l'émission individuelle des galaxies à 21 cm n'est envisageable que pour des objets proches avec les instruments actuels ; SKA¹ [18, 19] permettra de repousser cette limite et permettra l'observation des galaxies riches en gaz jusqu'à $z \gtrsim 1$. La méthode de la cartographie 3D de l'émission totale à 21 cm (Intensity Mapping) est une méthode originale qui permet de contourner cette difficulté. Elle a été proposée entre autres par U-L Pen et J. B. Peterson [12]. 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) [11, 9]. Ceci constitue une différence majeure avec les études menées précédemment pour SKA [17] ce qui se traduit à travers des spécifications instrumentales moins contraignantes. Cette méthode est désormais envisagée aussi avec SKA.

Un instrument interférométrique multi-lobes à grand champ de vue et à large bande ($\gtrsim 200 - 300$ MHz), et ayant une surface effective de $\sim 10\,000$ m², permettrait la cartographie de l'hydrogène atomique neutre jusqu'à $z \sim 2.5 - 3$ avec une résolution angulaire de l'ordre de la dizaine de minutes d'arc. Il serait optimisé pour la mesure des oscillations baryoniques. une caractérisation fine du spectre en fréquence des avant-plans Galactique (synchrotron...), le champ magnétique Galactique ou encore l'évolution de la fraction de gaz H_I avec le redshift sont quelques-uns des sujets qui pourront être abordés avec ce type

1. <https://www.skatelescope.org/>

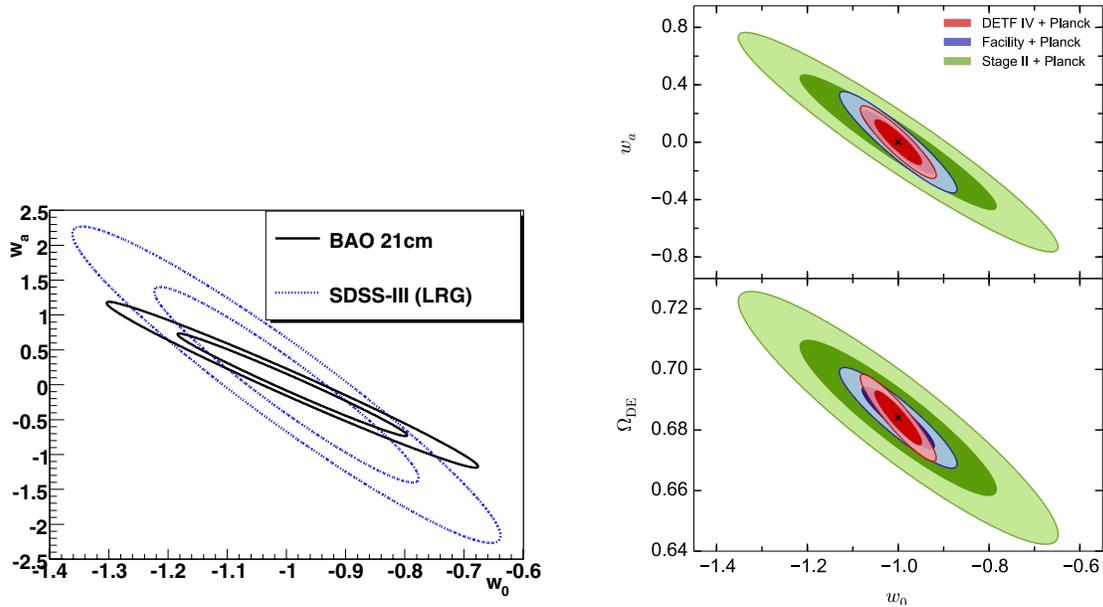


FIGURE 1 – Contraintes sur les paramètres de l’énergie noire obtenues avec des relevés à 21 cm. A gauche : Un relevé d’une durée de 3 ans, avec un réseau dense de 400 paraboles de 5 mètres de diamètre [7]. A droite : une comparaison de contraintes sur l’énergie noire obtenues avec des relevés H_I : *stage 2* correspond à des instruments spécialisés en cours de construction, et *Facility* correspond à un relevé sur un grand instrument, de type Tianlai-full [23]

de relevé, en exploitant les cartes 3D d’intensité (ou de température) d’émission.

Les relevés à 21 cm peuvent en principe couvrir une large bande en redshifts, jusqu’à $z \sim 3$, ce qui leur confère un fort potentiel pour contraindre l’équation d’état de l’énergie noire. Par ailleurs, ces relevés ont intrinsèquement une excellente résolution en décalage vers le rouge, leur permettant d’être sensible aux effets de distorsions dans l’espace des redshifts (RSD) [2]. Par contre, la contribution du bruit instrumental, caractérisé par la température système T_{sys} n’est pas négligeable et l’extraction du signal cosmologique à 21 cm à partir des observations est rendue très difficile par la présence des signaux d’avant-plans, synchrotron galactique et sources radio, très intenses [7]. Les graphes de la figure 1 représentent les contraintes attendues sur les paramètres de l’énergie noire à partir de relevés radio à 21 cm, et montrent que les relevés radio pourraient être compétitifs avec les relevés optiques dans les prochaines années.

1.2 Contexte national et international

CHIME est un instrument Canadien² qui utilise les mêmes concepts que ceux proposés par J. Peterson et BAORadio, en particulier un ensemble de grands réflecteurs cylindriques

2. <http://chime.phas.ubc.ca>

qui est en cours de construction à l'observatoire radio de Penticton au Canada. La version complète de CHIME comportera 5 cylindres de 100 mètres de long, et 20 m de large chacun. Chaque cylindre sera équipé de 256 récepteurs, couvrant la bande de fréquences 400-800 MHz. La construction d'une version *pathfinder*, formée de deux cylindres 37 m de long et 20 m, et équipés chacun de 64 récepteurs est bien avancée [3].

Deux autres projets de cartographie d'intensité H_I (HIRAX et BINGO) sont en cours d'élaboration, bien que moins avancés que CHIME et Tianlai. Le concept instrumental de BINGO [4] est basé sur l'utilisation d'un réflecteur unique de 25-30 mètres de diamètre et un ensemble de cornets au plan focal.

Des observations ont également été effectuées avec le télescope Parkes en Australie et le GBT (Green Bank Telescope) aux États-Unis. Elles ont permis en particulier l'observation de la corrélation entre structures à 21 cm et relevés optiques [5].

HIRAX

Le projet HIRAX³, qui sera situé sur le site de SKA en Afrique du Sud et pourrait à terme comprendre 1000 paraboles, vient d'obtenir un financement pour une première phase de la NRF⁴. Les premières observations sont prévues pour la fin 2017 et devront se poursuivre jusqu'en 2020. HIRAX peut-être considérée comme une version hémisphère sud du projet CHIME situé au Canada. Il y a en effet un recouvrement important entre les membres de l'équipe CHIME et ceux de l'équipe HIRAX dont Jon Sievers (professeur à l'Université KwaZulu-Natal à Durban, Afrique du Sud) est le PI. Cependant il y a des différences importantes : (1) HIRAX utilisera des paraboles de 5-6m de diamètre au lieu des réflecteurs cylindriques de CHIME ; (2) HIRAX sera construit sur le site de SKA dans le désert Karoo en Afrique du Sud, l'un des meilleurs sites mondiaux de radioastronomie ; (3) Il existe plus de relevés à d'autres fréquences depuis l'hémisphère sud, ce qui permettra de nombreuses études en corrélation croisée. Comme les autres projets, HIRAX vise également d'autres objectifs scientifiques comme la recherche de nouveaux pulsars.

Des chercheurs du laboratoire APC (M. Bucher et K. Ganga) ont été associés à la proposition HIRAX. Le projet étant désormais financé, des discussions seront menées pour définir leur rôle de manière plus précise et explorer la possibilité d'étendre l'implication française. La contribution envisagée actuellement portera sur l'analyse des données, en particulier la suppression des avant-plans, principalement du rayonnement synchrotron diffus, en mettant à profit l'expérience acquise dans Planck.

Tianlai

L'équipe Française engagée dans BAORadio est pour sa part associée au projet TIAN-LAI, mené par le NAOC (National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences), en collaboration avec un petit groupe de scientifiques internationaux, comprenant des scientifiques américains (Univ. Carnegie Mellon (Pittsburgh), Univ. of Wisconsin (Madison), Fermilab (Illinois)), canadiens (CITA, Toronto) et français (LAL, IRFU-CEA, Obs. de Paris). Une réunion de collaboration a eu lieu en juin 2014 à la suite du Workshop Intensity Mapping organisé à l'Obs. de Paris⁵. Une description plus détaillée de Tianlai se trouve dans la

3. <http://www.acru.ukzn.ac.za/cosmosafari/wp-content/uploads/2014/08/Sievers.pdf>

4. NRF (National Research Foundation) : principale agence de financement de la recherche scientifique en Afrique du Sud

5. <http://21cm-parisim.obspm.fr>

section 3.

PAON4 est un interféromètre de test qui permettra d'étudier certains aspects techniques et de traitement des données du réseau d'antennes paraboliques de Tianlai. Il servira également d'instrument de qualification pour NEBuLA. La méthode de cartographie 3D d'intensité d'émission HI est désormais envisagée aussi pour SKA, en particulier pour l'exploitation scientifique des observations avec les *Aperture Array (AA)*—. Une véritable synergie a effectivement émergé entre les activités BAORadio et celles de R&D pour SKA et sa préparation scientifique, comme en témoignent les travaux communs qui seront entrepris avec PAON et EMBRACE⁶ [15].

1.3 SKA et LOFAR/NenuFAR

LOFAR⁷ est un instrument radio européen principalement dédié à la recherche du signal de réionisation et comprenant deux ensembles de récepteurs, LBA (Low Band Antenna) couvrant la bande de fréquence 10-80 MHz et HBA (High Band Antenna) couvrant la bande 120-240 MHz. Le cœur de LOFAR se trouve aux Pays-Bas, avec plusieurs stations (ensemble d'antennes) réparties en Europe : Allemagne, Royaume-Uni, Suède et à Nançay, en France. La station LOFAR de Nançay comprend deux jeux de 96 antennes (HBA, LBA).

Le projet NenuFar (New Extension in Nançay Upgrading loFAR)⁸ correspond à une extension significative de la station LOFAR de Nançay avec, à terme, la réalisation d'un réseau de 96 mini-réseaux de 19 antennes chacun. NenuFAR pourra fonctionner comme instrument autonome, indépendant de LOFAR et a été labellisé *pathfinder SKA*. La recherche d'exo-planètes, étoiles binaires ou éruptives, de pulsars et de sources radio tournantes variables (RRAT's Rotating Radio Transients), l'étude de la matière interstellaire Galactique, de la formation des galaxies et de la réionisation, ou encore des atmosphères planétaires et de la physique du système solaire sont parmi les principaux sujets de physique de NenuFAR.

SKA⁹ est un projet international de très grand radiotélescope, couvrant une très large gamme de fréquences et capable de répondre aux besoins d'une communauté importante. Sa description dépasse largement le cadre de ce document. Nous rappelons simplement ici les principales caractéristiques du projet. Les principaux objectifs scientifiques de SKA peuvent être répartis selon cinq grandes thématiques : [18]

1. Les âges sombres de l'Univers et la réionisation : il s'agit d'observer la formation des premières étoiles à $z \sim 10$ qui ont mis fin à la période de l'histoire de l'Univers débutant à la recombinaison $z \sim 1100$, et qui ont réionisé presque totalement le gaz, en majorité de l'hydrogène atomique, dans l'univers.
2. Les tests de la gravité en champ fort : ces sujets peuvent être abordés avec la recherche et l'étude des pulsars et l'observation des disques d'accrétion autour des trous noirs.

6. <http://www.obs-nancay.fr/-EMBRACE-.html?lang=fr>

7. <http://www.lofar.org/>

8. <http://nenufar.obs-nancay.fr/>

9. <https://www.skatelescope.org>

3. L'évolution des galaxies, la cosmologie et l'énergie noire : SKA aura à terme une sensibilité suffisante pour détecter les galaxies à travers leurs émissions à 21 cm à des distances cosmologiques, au delà de $z \sim 1$. Les mesures à 21 cm apporteront des informations précieuses pour comprendre l'évolution des galaxies. La plupart des sondes cosmologiques utilisées en optique peuvent aussi être utilisées avec les observations radio.
4. L'origine et l'évolution des champs magnétiques cosmiques
5. L'origine de la vie

SKA devrait être composé de plusieurs instruments et construit sur deux sites, l'un situé en Australie et l'autre en Afrique du Sud, et en deux phases. Pour la première phase, le site Australien hébergera SKA1-low, alors que SKA-mid sera construit en Afrique du Sud.

1. SKA1-low couvre la bande de fréquence 50-350 MHz et sera principalement dédié à l'observation du signal de réionisation. Il sera constitué d'un grand nombre d'antennes log-périodiques ($\sim 250\,000$), réparties dans un cœur dense (diamètre ~ 1 km) et des stations plus petites, situées jusqu'à des distances de 45 km du cœur
2. SKA1-mid couvre la bande de fréquence de 350-3000 MHz et sera constitué d'un ensemble d'une centaine de réflecteurs (diamètre 13-15 m). Dans la phase 1, il y aura 64 antennes de 13.5 m en Afrique du Sud. Les réflecteurs et les optiques pourront fonctionner jusqu'à 20 GHz. SKA-mid sera adapté à l'observation de la raie à 21 cm jusqu'à $z \lesssim 3$, et à d'autres raies, comme celle d'OH.
3. Un autre instrument, SKA1-survey était initialement prévu pour la phase 1. Il a été écarté ou retardé suite à un travail de redéfinition (*rebaselining*) pour réduire le budget de construction pour la première phase en dessous de 650 ME. SKA-survey était constitué d'un ensemble de réflecteurs, équipés avec des récepteurs multi-éléments au foyer (PAF, Phased Array Feeds).
4. SKA-AA : La technologie *Aperture Array* de type EMBRACE n'est pas prévue pour la phase I de SKA. Elle pourra être introduite pour la phase 2.

L'objectif de la phase 1 est la construction d'un instrument avec $\sim 10\%$ de la surface collectrice finale, $100\,000\text{ m}^2$ environ avec les instruments SKA1-low, SKA1-mid. Le début de la construction est prévue pour 2018, avec une mise en service vers 2023-2024. Le budget prévu de SKA-phase 1 est de 650 millions d'euros.

Les performances des relevés H_I de SKA sont discutées par exemple dans la référence [20]. Une comparaison des performances en termes de contraintes sur les paramètres cosmologiques et de l'énergie noire par différents relevés 21 cm en cours ou en projet est présentée dans la référence [23].

2 Projet BAORadio

2.1 présentation générale

Comme indiqué ci-dessus, le projet BAORadio (BAO's à 21 cm) a démarré fin 2006, sous l'impulsion de quelques physiciens du LAL (IN2P3) et de l'Irfu-SPP. La collaboration s'est

élargie très rapidement à l'observatoire de Paris mi-2007. L'effort a porté dans un premier temps sur le développement électronique pour un réseau interférométrique à 21 cm. Les activités ont été élargies et incluent un programme observationnel, le développement d'un interféromètre de test (PAON) et des méthodes de reconstruction et d'analyse. Le paragraphe présente un résumé chronologique des activités et des projets développés dans le cadre de BAORadio¹⁰.

- 2007 début du développement du système BAORadio
- 2008 premiers tests de la chaîne électronique BAORadio en laboratoire et à Nançay
- 2009 premières observations en mode interférométrique avec les réflecteurs cylindriques à Pittsburgh. Recherche de sites d'accueil pour l'instrument au Maroc
- 2010 observations en mode interférométrique avec 32 voies de numérisation et calcul au vol des visibilitées avec le corrélateur logiciel à Pittsburgh.
- 2011 Premières observations avec FAN [14]
 - Observations avec le NRT et l'électronique BAORadio pour le programme HICluster (Amas@Nançay)
 - Premiers contacts avec l'équipe du NAOC (Chine)
 - Observations de longue durée avec le système BAORadio et le NRT pour le programme HICluster
- 2012 Structuration du projet PAON (interféromètre de test à base de petites paraboles à Nançay)
 - Mise en place de la collaboration Tianlai
- 2013 Déploiement et observations avec PAON-2.
 - Première analyse complète des observations du programme HICluster (Amas@Nançay).
 - Conception et réalisation des antennes de PAON-4
- 2014 Déploiement des antennes PAON-4 de D=5m de diamètre à Nançay.
 - Finalisation de l'analyse HICluster
 - Développement des codes de reconstruction de cartes 3D, Etude des configurations d'antenne pour PAON-4 (travail de thèse J. Zhang, en cours)
- 2015 Observations avec PAON-4
 - Etude des configurations de réseau pour Tianlai
 - Publication de l'analyse HICluster
 - Analyse des données PAON-4 et mise au point des méthodes de calibration en gain et en phase (thèse de Q. Huang, en cours)

2.2 La chaîne électronique BAORadio

La chaîne BAORadio utilise des circuits câblés à base de FPGA afin d'obtenir une puissance de traitement importante, avec un coût et une consommation modérés [10, 8]. La conception de ce système s'approche de celle de la banque de composants CASPER développée à Berkeley aux Etats-Unis¹¹, ou de l'initiative de RadioNet en Europe, avec le développement

10. <http://bao.lal.in2p3.fr> <http://groups.lal.in2p3.fr/bao21cm/>

11. <http://casper.berkeley.edu/>

de la carte UNIBOARD¹². 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.

Le système, développé par le LAL et l'Irfu, comprend des modules analogique de filtrage et de décalage en fréquence, des cartes de traitement numérique et un système d'acquisition et de traitement de données. Le cœur du système est constitué par la carte de numérisation (*carte ADC*), capable de numériser les signaux analogiques sur 4 voies en entrée à une fréquence d'échantillonnage de 500 MHz, puis d'effectuer au vol le filtrage numérique des signaux pour les séparer en composantes quasi-monochromatiques (FFT). Les données brutes (forme d'onde) 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 système comprend également un module de réception des données à la norme PCI-Express, capable de soutenir des débits de plusieurs centaines de méga-octets/s, qui permet le transfert des données vers la mémoire des ordinateurs d'acquisition. Un sous-système de distribution d'horloge et de signaux de synchronisation avait été développé également dans l'optique d'équiper un grand réseau interférométrique. Les modules électroniques sont complétés par un ensemble de programmes flexibles à haute performance (parallèle, multi-core, multi-machines) permettant l'acquisition, le calcul des corrélations (visibilités) et le traitement hors ligne des observations.

Ce système a été testé au foyer du radiotélescope décimétrique (NRT), et en mode interférométrique sur les cylindres à Pittsburgh et sur le prototype de réseau phasé FAN [14]. Il équipe actuellement PAON-4.

Une évolution de cette chaîne est envisagée à présent à travers le développement de la carte NEBuLA (Numériseur à bande large pour la radio-Astronomie) sous la co-responsabilité de C. Viou de Nançay et D. Charlet du SERDI/LAL. Ce projet est décrit dans la section 3.

2.3 Tests et observations à Pittsburgh

Une campagne d'observation en mode interférométrique avec 16 voies de numérisation a été menée à Pittsburgh en novembre 2009, auprès du prototype de réflecteurs cylindriques (CRT), construit par J. Peterson et K. Bandura à l'Université Carnegie-Mellon [13]. La décomposition en composantes de Fourier (FFT) était effectuée par les FPGA, sur les cartes ADC, 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'inter-calibration 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 ADC couplées à un corrélateur logiciel constitué de 8 PCs interconnectés. Tout a parfaitement fonctionné du point de vue de l'électronique BAORadio et des logiciels de calcul au vol des visibilités (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

12. <http://www.radionet-eu.org/uniboard> Advanced Radio Astronomy in Europe (RadioNet)

sensibilité escompté par rapport à la précédente campagne de mesures en novembre 2009.

2.4 Programme HICluster

Nous avons mené à Nançay un programme d'observation en vue de la recherche d'émission HI dans des amas proches ($z < 0.12$) Abell 85, Abell 1225 et Abell 2440. Deux polarisations orthogonales du récepteur cryogénique du radio-télescope décimétrique de Nançay (NRT) ont été analysées à la fois par le système de lecture *standard* (ACRT) et par la chaîne d'électronique BAORadio. Les observations de routine ont été effectuées de mars à octobre 2011 et nous avons accumulé plus de 140 TeraBytes de données, correspondant à environ 65h d'observations brutes (mode RAW). Les données sont archivées au Centre de Calcul de l'IN2P3 à Lyon.

Nous avons pu montrer que le système BAORadio permettait d'atteindre des sensibilités très proches de la sensibilité nominale du NRT, pour des temps d'intégration de quelques heures, et bien meilleure que celle du corrélateur standard ACRT sur une large bande, grâce à l'échantillonnage temporel fin de BAORadio. Nous avons constaté une amélioration de plus d'un facteur 50 par rapport à la chaîne d'acquisition et de traitement standard du NRT, et de plus d'un facteur 5 par rapport à une analyse spécifique et optimisée des données de ACRT. Cette analyse nous a par ailleurs permis de mesurer le signal H_I des galaxies des amas A85 et A1205 [6]

3 BAORadio : projets en cours

3.1 PAON-4

PAON-4 est un petit interféromètre de test à large bande (bande L, 1250-1500 MHz) comprenant 4 antennes de 5 mètres de diamètre, déployé à l'observatoire de Nançay. PAON-4 a une surface collectrice d'environ 75 m² et 8 récepteurs (2 polarisations orthogonales par antenne). 36 visibilités (8 autocorrélations et 28 corrélations croisées, avec un échantillonnage temporel de ~ 1 seconde) sont calculées par le système électronique/informatique BAORadio. La photo de la figure 2 ci-dessous les réflecteurs équipés avec les récepteurs (feeds). Cet instrument permet une étude complémentaire au *pathfinder* TIANLAI-16D (16 paraboles) dans le cadre de la mise au point d'un interféromètre grand champ utilisant un grand nombre (quelques centaines) de *petites paraboles* pour un relevé cosmologique à 21 cm.

Après une phase d'étude d'un petit interféromètre constitué par 2 paraboles de D=3m à Nançay (phase PAON-2 de 2012), 4 antennes de D=5 m ont été conçues et réalisés par le GEPI (Obs. de Paris) en 2013 pour la phase PAON-4. La première parabole a été testée à Meudon en Septembre 2013 afin de valider la conception et la réalisation par les entreprises d'un marché public soumis par le LAL à cette occasion. Le déploiement mécanique de l'interféromètre s'est terminé en Juillet 2014; il a nécessité 7 missions sur le terrain (3-5 jours chacune), la mobilisation de 11 personnes, correspondant à environ 500h de travail. Le montage des 4 cornets au point focal et le déploiement des 8 voies électroniques a eu lieu pendant l'automne 2014 et l'hiver 2015. La phase de caractérisation de l'interféromètre a commencé en mars 2015 et se poursuit encore actuellement. PAON-4 a été équipé dans



FIGURE 2 – PAON4 : interféromètre de test comprenant 4 réflecteurs de 5 mètres de diamètre

un premier temps avec les composants actuels de la chaîne BAORadio. Dans une seconde phase (fin 2016/2017), quand le développement de la carte NEBuLA (NumÉriseur à Bande Large pour l’Astronomie) sera terminé, elle remplacera l’ancien système : la numérisation se fera ainsi sur des cartes autonomes au plus près des antennes et permettra de transporter les signaux par fibre optique jusqu’au corrélateur central. Ceci permettra de supprimer les modulations de la réponse en fréquence que nous observons avec le système actuel en s’affranchissant des réflexions dans les câbles entre les divers étages d’amplification et les cartes de numérisation. La cadence (taux d’acquisition, fraction de temps utile sur ciel) pourra aussi être augmentée en renforçant et en améliorant le corrélateur central. Depuis la mise en service de l’instrument, les phases d’observations et les analyses associées ont pour but une caractérisation fine de l’instrument : lobe de chaque antenne, sensibilité et niveau de bruit ... Nous tentons également d’augmenter la cadence des observations en automatisant les traitements, afin de mener des campagnes d’observation de longue durée. La finalité est en effet de pouvoir reconstruire des cartes 3D (2 angles + fréquence) par des transits du ciel sur de longues durées.

3.2 NEBuLA

NEBuLA est un développement conjoint du LAL (Univ. Paris-Sud, CNRS/IN2P3) et de l’unité de radioastronomie de Nançay (Observatoire de Paris - CNRS/INSU). Une première version de la carte devrait être disponible pour les tests mi-2016. Il s’agit d’une carte de numérisation avec une fréquence d’échantillonnage de 1 GHz, avec deux entrées pour signaux RF, (re)programmable et configurable à distance qui a pour vocation générale de numériser la bande RF d’une antenne (ex. au pied d’une parabole, au foyer d’un radiotélescope)

afin d'exporter les données sur fibre optique vers un ordinateur central. Elle reçoit les références en temps et fréquence pour permettre le traitement multi-antennes dans le cadre d'un interféromètre. Le cahier des charges de NEBuLA impose également des contraintes environnementales comme : un fonctionnement en extérieur de -20°C à 60°C et l'utilisation d'alimentation 12V. Les premiers *clients* visés mentionnés lors de la présentation au Conseil Scientifique de l'Observatoire sont le NRT, le radio-héliographe constitué de 47 antennes et PAON.

La difficulté technique de ce projet n'est pas la numérisation en tant que telle car elle sera effectuée par des ADC du commerce. Il faut par contre assurer un fonctionnement synchronisé en temps et en fréquence (syntonisation) de tous les numériseurs de l'instrument, qui peuvent être répartis sur une surface de plusieurs milliers de m^2 dans le cas d'un interféromètre pour la cartographie d'intensité (Intensity Mapping). Les connecteurs *cuivre* (connexions électriques) seront utilisés uniquement pour les signaux RF et l'alimentation au niveau de la carte NEBuLA, ce qui devrait limiter la sensibilité de cette nouvelle chaîne aux interférences électromagnétiques (RFI).

La solution envisagée est l'utilisation du protocole White Rabbit (WR)¹³ de Seven Solutions, utilisé également au CERN et qui est en cours de normalisation par IEEE. Il s'agit d'une sur-couche du protocole Ethernet permettant une synchronisation des paquets et une distribution d'horloge. La carte NEBuLA sera équipée de quelques circuits spécifiques et le portage du code de Seven Solutions sur des FPGA Altera est en cours. Notons que le système White Rabbit irrigue déjà le domaine de la radio-astronomie comme le montre les présentations au 3^{ème} workshop sur la VLBI¹⁴. Cependant, une solution de repli alternative à WR serait d'utiliser une synchronisation par distribution d'horloge simple comme dans le cas de PAON4.

3.3 Tianlai

Tianlai, qui signifie *son cosmique en chinois*, est un projet de cartographie 3D à 21 cm mené par le NAOC (National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Pékin) [21]. Convaincu par les idées de J. Peterson et de Ue-Li Pen, le Prof. X. Chen (NAOC) a créé le projet en y associant plusieurs instituts ou entreprises d'état chinois. Il s'agit en particulier de l'institut 54, spécialisé dans la construction des antennes et des équipements électroniques pour les télécommunications et les radars, ainsi que *l'institute of Automation*, spécialisé dans la conception de circuits intégrés et de systèmes électroniques numériques. Nous avons été partenaire du projet et acteur de sa conception et de sa définition dès l'émergence de l'idée, en 2011, avec J. Peterson (Univ. Carnegie Mellon - Pittsburgh), P. Timbie (Univ. of Wisconsin - Madison), A. Stebbins (Fermilab - Illinois) et Ue-Li Pen (CITA, Toronto).

L'emplacement de l'instrument TIANLAI a été choisi après une longue campagne de recherche et d'évaluation des sites, en particulier du point de vue de bruit radioélectrique. Le site choisi (Hongliuxia (Lat=44.15 N, Long=91.8 E)) se trouve dans la province du Xinjiang a proximité d'un petit village. Le génie civil est terminé avec le terrassement d'une route

13. Seven Solutions <http://www.whiterabbitsolution.com/>

14. (<http://www.jive.nl/ivtw2014/>)



FIGURE 3 – Réseau de paraboles et les 3 cylindres de Tianlai (Septembre 2015)

comprenant un petit pont, la préparation du terrain à l’emplacement des antennes, l’acheminement d’une ligne électrique (10 kV) et d’un câble de fibres optiques sur ~ 7 km, et la construction d’un lieu de vie.

La construction de l’instrument dans sa phase actuelle (Pathfinder) est entièrement sous la responsabilité de nos collègues chinois du NAOC. Ils ont obtenu un financement pour construire un ensemble de 3 grands cylindres (15m x 40m) et un réseau de 16 antennes avec des réflecteurs de 6 m de diamètre chacun. Les 3 cylindres seront équipés chacun avec 32 récepteurs (feed, 2 polarisations chacune) dans la phase Pathfinder. Le nombre de récepteurs pourra être porté à 72 dans la version étendue (Pathfinder+). La version complète de Tianlai pourra comporter 8 cylindres de 120 m de long, équipés avec 256 récepteurs chacun. Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques de ces instruments. La figure 4, extraite de la référence [22] donne un aperçu du potentiel de la version actuelle de Tianlai (Pathfinder), de la version étendue (Pathfinder+) et de la version complète (full).

Tianlai	nb. cyl.	largeur	longueur	nb. rec/cyl	Bande (MHz)
Pathfinder	3	15 m	40 m	32	700-800
Pathfinder+	3	15 m	40 m	72	700-800
Full	8	15 m	120 m	256	400-1420

La construction de 3 antennes cylindriques et du réseau de 16 paraboles est terminée (première phase du projet). Une réunion de collaboration a eu lieu à Balikun, principale ville de la région de Hongliuxia, début septembre 2015¹⁵ et la figure 3 montre l’état d’avancement du réseau d’antennes à ce moment. Les signaux analogiques sont transmis sur des fibres optiques jusqu’au corrélateur situé dans le village à 7 km. Un système d’acquisition et de traitement haute performance (corrélateur), conçu et réalisé par *Institute of Automation*, traite les

15. <https://indico.lal.in2p3.fr/event/2977/> ou <http://tianlai2015.csp.escience.cn/dct/page/1>

192 signaux analogiques issus des récepteurs répartis sur les cylindres. Celui-ci comprend des modules ADC-FPGA, qui assurent la numérisation des signaux et la décomposition en composantes de Fourier (fréquences), interconnectés à des cartes DSP qui effectuent le calcul des corrélations (visibilités). Le traitement des signaux issues du réseau des paraboles est assuré par un système analogue à 32 voies.

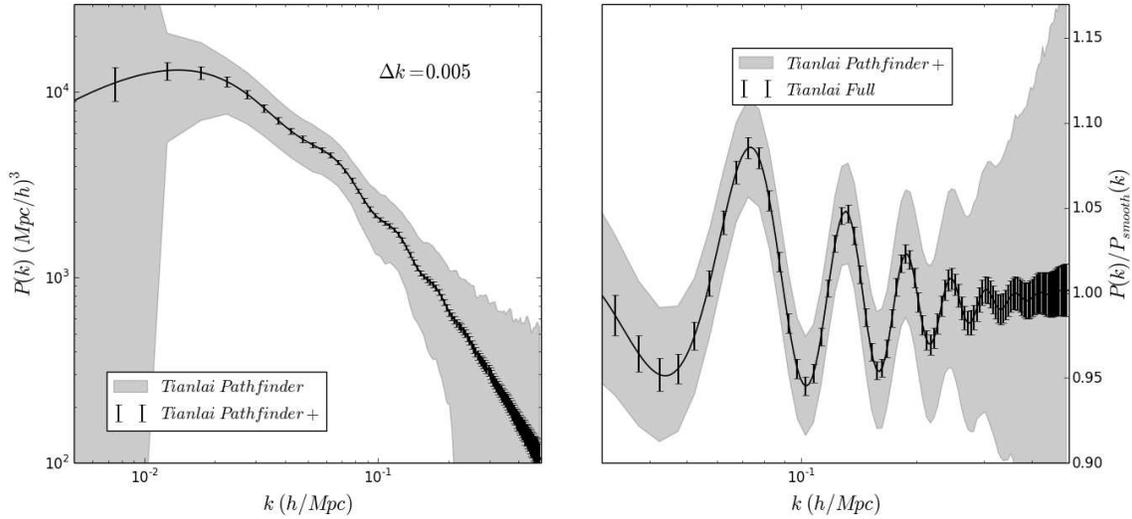


FIGURE 4 – Potentiel de Tianlai (Pathfinder et Pathfinder+) pour la mesure du spectre des puissances $P(k)$ des grandes structures (à gauche) - Observation des BAO's avec Tianlai Pathfinder+ et la version complète (full) (à droite) - Figure extraite de la référence [22]

Par le biais de l'interféromètre PAON-4 à Nançay nous participerons à la compréhension du réseau de paraboles de Tianlai, et à la mise au point des programmes de traitement des données (calibration, reconstruction de cartes) du réseau de paraboles et des cylindres. Nous avons contribué à la définition de la configuration des instruments et nous travaillons aussi sur les stratégies d'observation, les méthodes de calibration et la reconstruction des cartes 3D du ciel à partir des observations.

Références

- [1] Amendola, L. & Tsujikawa, S., *DARK ENERGY, Theory and Observations*, Cambridge University Press (2010)
- [2] Weinberg, D. H. , Mortonson, M. J. , Eisenstein, D. J. , Hirata, C. , Riess, A. G. Rozo, E., *Observational probes of cosmic acceleration*, Phys. Rep. 530 (2013) doi 10.1016
- [3] K. Bandura et al. , SPIE, *Astronomical Telescopes + Instrumentation* (2014) arXiv:1406.2288
- [4] R. A. Battye, M. L. Brown, I. W. A. Browne, R. J. Davis, P. Dewdney, C. Dickinson, G. Heron, B. Maffei, A. Pourtsidou, P. N. Wilkinson , *BINGO : a single dish ap-*

- proach to 21cm intensity mapping* MNRAS 434 (2013) 10.1093/mnras/stt1082
arXiv:1209.1041
- [5] Masui, K. W. Switzer E. R. Banavar N. Bandura K. Blake C. Calin L.-M. Chang T.-C. Chen X. Li Y.-C. Liao Y.-W. Natarajan A. Pen U.-L. Peterson J. B. Shaw J. R. Voytek T. C. *Measurement of 21 cm Brightness Fluctuations at $z \sim 0.8$ in Cross-correlation* ApJ 763 , L20 (2013) doi: 10.1088/2041-8205/763/1/L20 - arXiv:1208.0331
- [6] R. Ansari, J.E Campagne, P. Colom, C. Ferrari, Ch. Magneville, J.M. Martin, M. Moniez, A.S. Torrento, *On sky characterization of the BAORadio wide band digital backend, Search for HI emission in Abell85, Abell1205 and Abell2440 galaxy clusters* Exp. Astronomy (2015), doi: 10.1007/s10686-015-9477-7 arXiv:1505.02623
- [7] 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*, A&A 540, (2012) A129, arXiv:1108.1474
- [8] R. Ansari, J.E. Campagne, P.Colom, C. Magneville, J.M. Martin, M. Moniez, J.Rich, and C.Yèche, *BAORadio : A digital pipeline for radio interferometry and 21 cm mapping of large scale structures* Compte Rendu Physique (comptes-rendus de l'Académie des Sciences), Volume 13, (2012) page 46 (arXiv :1209.3266)
- [9] Ansari, R., Le Goff, J.-M., Magneville, C., Moniez, M. , Palanque-Delabrouille, N., Rich, J., Ruhlmann-Kleider, V., & Yèche, C. , arXiv :0807.3614 (2008)
- [10] D. Charlet et al., IEEE Transactions on Nuclear Science, 58, 4, (2011) 1833
- [11] Chang, T., Pen, U.-L., Peterson, J.B. & McDonald, P., Phys. Rev. Lett., 100, 091303 (2008)
- [12] Peterson, J.B., Bandura, K., & Pen, U.-L., Moriond Conference Proceedings, arXiv :astro-ph/0606104 (2006)
- [13] Bandura, K., *Pathfinder for a Neutral Hydrogen Dark Energy Survey*, PhD thesis, Carnegie-Mellon University (Department of Physics) (2011)
- [14] Martin, J.M. et al, *FAN : Étude d'antennes en réseau au foyer du Radiotélescope de Nançay*, C. R. Physique 13 (2012)
- [15] S.A. Torchinsky, A.O.H. Olofsson, B. Censier, A. Karastergiou, M. Serylak, P. Renaud, C. Taffoureau *EMBRACE@Nancay : An Ultra Wide Field of View Prototype for the SKA* arXiv:1504.03854
- [16] S. Bosse et al. *R&D at Nançay for radio astronomy detectors and systems* , Astrophysics Detector Workshop 2008 P. Kern (ed) EAS Publications Series, 37 127-134 (2009)
- [17] Abdalla, F.B. & Rawlings, S., MNRAS, 360, 27 (2005)
- [18] *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array* , Proceedings of Science <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=215> or <https://www.skatelescope.org/news/ska-science-book/>
- [19] *Science with the Square Kilometre Array*, eds : C. Carilli, S. Rawlings, New Astronomy Reviews, Vol.48, Elsevier (2004)
- [20] Yahya, S. Bull, P. Santos, M. G. Silva, M. Maartens, R. and Okouma, P. Bassett, B. *Cosmological performance of SKA H I galaxy surveys* MNRAS 450 (2015) doi: 10.1093/mnras/stv695 arXiv:1412.4700

- [21] X. Chen *The Tianlai project : a 21cm cosmology experiment* (2012) arXiv:1212.6278
- [22] Y. Xu , X. Wang and X. Chen *Forecasts on the Dark Energy and Primordial Non-Gaussianity Observations with the Tianlai Cylinder Array* ApJ 798 (2015) 10.1088/0004-637X/798/1/40 arXiv:1410.7794
- [23] Philip Bull, Pedro G. Ferreira, Prina Patel, Mario G. Santos *Late-time cosmology with 21cm intensity mapping experiments* ApJ 803 (2015) doi: 10.1088/0004-637X/803/1/21 arXiv:1405.1452
- [24] J. Landon et al., *PHASED ARRAY FEED CALIBRATION, BEAMFORMING, AND IMAGING*, The Astronomical Journal, vol. 139, no. 3, p. 1154-1167, (2010)