



L'ÉLECTROMAGNÉTISME, 150-1 UNE SCIENCE EN PLEINE ACTION !

La RadioAstronomie pour Tous

RadioAstronomy for Everyone

P. Caïs, W. d'Anna*, B. Quertier*, F. Herpin**

** CNRS, LAB, UMR 5804, F-33270, Floirac, France
Univ. Bordeaux, LAB, UMR 5804, F-33270, Floirac, France*

Mots-clefs : RadioAstronomie, Würzburg, Hydrogène atomique HI, Pédagogie

Keywords : Radioastronomy, Würzburg, neutral Hydrogen HI, Education

Résumé

Le Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux (anciennement Observatoire de Bordeaux) est doté sur son site d'un radiotélescope Würzburg de 7.5m de diamètre, utilisé dans le domaine de la radioastronomie. Cet instrument, ancien radar de la deuxième guerre mondiale, a été utilisé à l'Observatoire de Bordeaux à partir des années 1960 pour des observations solaires routinières à la fréquence de 930MHz. Abandonné dans les années 1990, le radiotélescope est maintenant rénové et ouvert au grand public depuis Mai 2011.

Un système électronique nouveau et un programme informatique développé en Python permettent de pointer l'antenne, de détecter et d'analyser le signal radio émis par les sources astronomiques. Une interface Web réalisée en PHP permet de faire le lien entre l'instrument et l'utilisateur sur internet.

Chaque utilisateur peut réserver du temps d'observation pour mesurer l'émission radioélectrique de zones ou de sources à la fréquence de l'hydrogène atomique HI, soit 1420MHz. Un manuel d'utilisation est mis en ligne afin d'aider les utilisateurs à utiliser l'antenne et exploiter leurs données en utilisant le logiciel GILDAS. Un exemple didactique de cartographie de la galaxie est même mis à disposition pour permettre à des enseignants de réaliser un projet pédagogique.

L'utilisation de ce radiotélescope permet ainsi de découvrir la radioastronomie, en observant depuis chez soi ou depuis une classe, d'appréhender des notions fondamentales comme les repères, les échelles, l'effet Doppler, la spectroscopie et acquérir les qualités nécessaires au traitement et à l'analyse d'une observation (rigueur, précision, esprit critique, bases mathématiques, rédaction). C'est aussi un moyen de découvrir les technologies et savoirs utilisés dans la Recherche.

Introduction

Nous avons débuté à l'automne 2007 sur le site du LAB/OASU à Floirac, près de Bordeaux, la rénovation d'un radiotélescope Würzburg afin de le transformer en un outil pédagogique et de vulgarisation performant. Depuis mai 2011, l'étude du HI galactique et de l'émission OH est possible. L'instrument est mis à disposition à la fois des enseignants (tous niveaux d'enseignement, mais principalement lycée), des étudiants et des amateurs via une interface web ou en local. Nous proposons d'utiliser ce radiotélescope via internet, et/ou lors de mini-stages sur site encadrés par le personnel de recherche. A terme, nous souhaitons inclure cet outil au projet « Hands-On Universe ».

Dans un premier temps, l'historique du Würzburg est retracé, puis les détails de la rénovation de l'électronique de l'instrument sont présentés. Enfin, sa manipulation à partir de l'interface web et des exemples d'observations sont exposés.

1. Historique du Würzburg

1.1. Construction des Würzburg

Construits en grand nombre pendant la deuxième guerre mondiale, les radars dénommés "Würzburg" ont été le premier système de radar au sol pour le guidage d'artillerie de l'armée allemande. Équipé d'une parabole de 3m de diamètre et fonctionnant en impulsion à une fréquence proche de 550MHz, cette première version de radar atteignait quelques dizaines de km. Ensuite sont arrivés les plus gros Würzburg de plus de 7m de diamètre, montés sur wagon qui permettaient une surveillance d'une centaine de km.

À la fin de la guerre, trois modèles sont réquisitionnés par les alliés qui serviront au développement d'une nouvelle technique en France, la Radioastronomie. Deux équipes françaises, l'Ecole Normale Supérieure et l'Institut d'Astrophysique ont ainsi réussi à développer des recherches sur le soleil et sur l'origine des sources brillantes de notre galaxie ou en dehors. Les travaux réalisés ont ainsi donné naissance à la station de radioastronomie de Nancay [1].

L'une des trois antennes a été longuement utilisée à Marcousis puis à l'Observatoire de Meudon, en particulier pour étudier l'émission radio solaire durant les éclipses [1]. Ceci a contribué à mieux comprendre la nature elliptique des émissions radio de la couronne solaire. Par la suite, cet instrument a été transféré à l'Observatoire de Bordeaux avec sa monture équatoriale.

1.2. Le Würzburg à l'Observatoire de Bordeaux

D'un diamètre de 7.50m (Figure 1), la parabole rigide est constituée de tuiles d'aluminium juxtaposées, couvertes de panneaux de grillage rectangulaire. L'espace entre les mailles est d'environ 10mm, alors que la taille du grillage est d'environ 2mm. La distance focale de 1.7m, la parabole a une profondeur 1.9m, le foyer se trouve donc à l'intérieur de l'antenne. Le Würzburg était équipé d'un dipôle demi-onde de 16cm à son foyer.

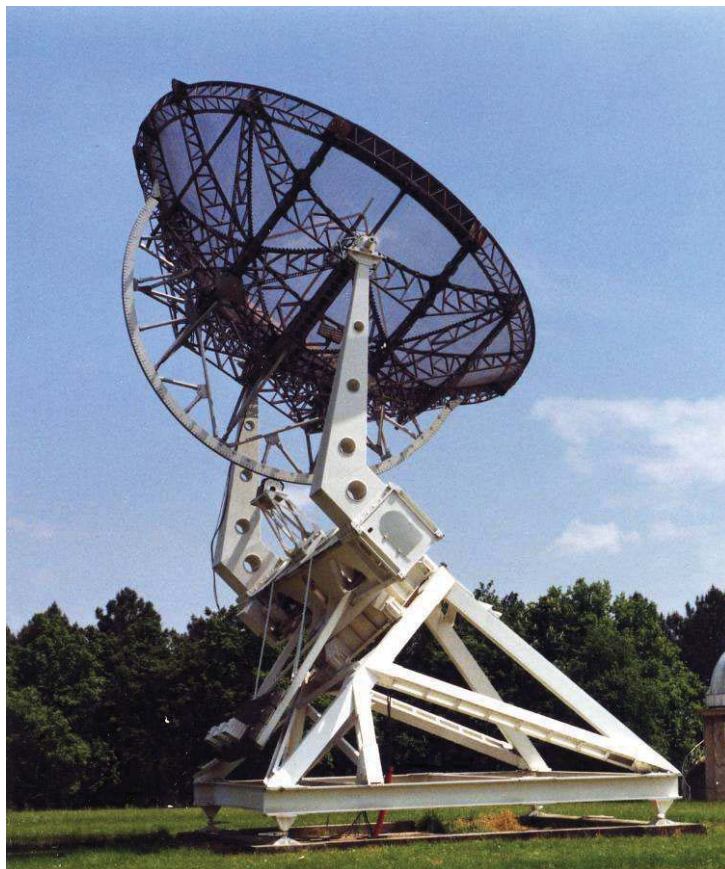


Figure 1 : radiotélescope Würzburg installé à Bordeaux

Arrivé en 1962, le radiotélescope Würzburg de Bordeaux est finalement mis en service en 1966. A partir de cette date, il a été principalement utilisé pour l'observation du Soleil à 930 MHz ($\lambda=30\text{cm}$), et ce jusqu'en 1982, avec quelques observations de fortes radiosources galactiques à des fins d'étalonnage (Cassiopeia A, Taurus, Cygnus).

Des enregistrements réguliers du flux solaire global, du flux du soleil calme et des éruptions ou sursauts solaires sont alors effectués. Ce flux ainsi que les événements particuliers observés sont systématiquement publiés dans la revue "Solar Geophysical Data" [5] dans le cadre d'une coopération de surveillance solaire internationale.

Enfin en 1982, après 16 années d'utilisation, le radiotélescope Würzburg est délaissé au profit du récepteur POM (petite antenne de 3m observant en millimétrique), plus performant, nouvellement installé à Bordeaux.

Une tentative de reprise d'activité avec automatisation du pointage et de la mesure du flux est effectuée en 1995. Avec l'avènement des télécommunications mobiles, la bande de fréquence autour de 930MHz utilisée par le Würzburg tombait malheureusement dans celle réservée au GSM. La mesure du flux du soleil ne pouvait plus avoir lieu sans changer de récepteur, ce qui a conduit à arrêter le Würzburg.

2. Projet pédagogique

À l'automne 2007, la rénovation du radiotélescope Würzburg du LAB a été entreprise avec deux objectifs : faire de cet instrument un outil pédagogique performant et l'utiliser comme moyen de vulgarisation et de communication vers le grand public.

Du point de vue pédagogique l'instrument est destiné aussi bien aux professeurs et élèves du secondaire (notamment dans le cadre de Travaux Personnels Encadrés), qu'aux étudiants d'université (stage de Master). Le Würzburg est aujourd'hui un outil de vulgarisation scientifique pour faire découvrir la radioastronomie au plus grand nombre et c'est aussi une vitrine technique car plusieurs sous-systèmes électroniques développés par le LAB pour le radiotélescope international ALMA équipent désormais le Würzburg nouvelle génération.

Le radiotélescope permet notamment d'observer :

- l'hydrogène HI galactique en émission/absorption à 21 cm de longueur d'onde, soit à une fréquence de 1420,4 MHz,
- les émissions maser OH à 1,6-1,7GHz

La plupart du gaz dans notre galaxie est sous forme d'hydrogène atomique HI, qui émet un rayonnement radio à une longueur d'onde de 21 cm (c'est-à-dire une fréquence de 1420 MHz). La raie à 21 cm avait été prédite théoriquement en 1945 par van de Hulst [2] et a été observée pour la première fois en 1951. La plupart des étoiles et du gaz de notre galaxie se situe dans un disque fin, et comme ce rayonnement n'est pas "éteint" par la poussière, il est possible d'observer l'ensemble de la galaxie.

OH fut la première molécule astronomique détectée en 1963 [3] dans la partie radio du spectre électromagnétique. Les raies spectrales de OH sont aux longueurs d'onde 2.2, 3.7, 5.0, 6.3 et 18 cm. Cette molécule est observée dans l'atmosphère terrestre, les atmosphères planétaires, dans les comètes, dans les nuages moléculaires, les galaxies, mais surtout dans les étoiles évoluées (étoiles plus vieilles que notre Soleil et de masse équivalente) sous forme de rayonnements maser. Le rayonnement maser à 18 cm du radical OH émis par les étoiles évoluées est en fait constitué de 3 raies : les raies dites principales à 1665 et 1667 MHz et la raie satellite à 1612 MHz. Selon l'intensité des raies maser OH, on peut classer les étoiles évoluées en différents groupes (type I ou II). On peut aussi étudier la périodicité de ce rayonnement par rapport à la variation de luminosité de l'étoile (la courbe de lumière de la plupart de ces étoiles est connue et les données sont disponibles). Le spectre « classique » des émissions maser OH est caractérisé par un profil double-pics. De la séparation en vitesse des 2 pics, on peut déduire la vitesse d'expansion de l'enveloppe OH, tandis que la vitesse médiane donne la vitesse de l'étoile centrale.

3. Caractéristiques du radiotélescope

La majeure partie de l'électronique utilisée pour la rénovation du radiotélescope Würzburg est une électronique développée par le LAB pour l'observatoire international ALMA [4]. Aussi cette électronique est-elle "surdimensionnée" pour une observation du HI à 1420MHz. En particulier, la bande de signal analogique délivrée par le cornet peut être numérisée directement, aucune découpe et descente en fréquence n'est nécessaire. L'électronique du Würzburg est donc quasi exclusivement une électronique numérique de détection et d'analyse du signal. Autre particularité, la puissance de calcul des cartes de traitement numérique du signal permet d'extraire simultanément les bandes de fréquence ON (avec signal source) et OFF (sans signal source), utilisées pour réaliser une détection du signal par différence des spectres ("frequency switch").

3.1. Principales caractéristiques du radiotélescope

Les principales caractéristiques sont reportées dans le Tableau 1.

Il faut noter que le système a été étudié pour observer la bande 1.4-2.7GHz ; cependant, un filtre placé en tête dans l'antenne afin de couper les principaux parasites locaux, limite notre fenêtre d'observation à 1.4-1.7GHz. Dans le futur, une modification de ce filtre est à prévoir pour permettre d'exploiter tout le potentiel de l'instrument.

Caractéristique	
Diamètre effectif de l'antenne [7]	~5m
Résolution spatiale (à 1420MHz)	~2.7 °
Précision de pointage	~0.5 °
Fréquence d'observation	1.4-1.7GHz
Bande d'observation	10MHz
Nombre de sous bandes	2 sous bande : une ON et une OFF
Nombre de canaux	2048 sur chaque sous-bande
Résolution spectrale	5kHz
Température système	400K
Temps d'intégration	> 1s, <30 min

Tableau 1 : principales caractéristiques du radiotélescope

3.1. Eléments techniques

Le système rénové se compose d'une antenne, d'un récepteur (cornet et système analogique), d'un détecteur électronique numérique (numérisation, filtrage, corrélation) et d'un système informatique (programme Python et serveur web). Voici le synoptique (Figure 2).

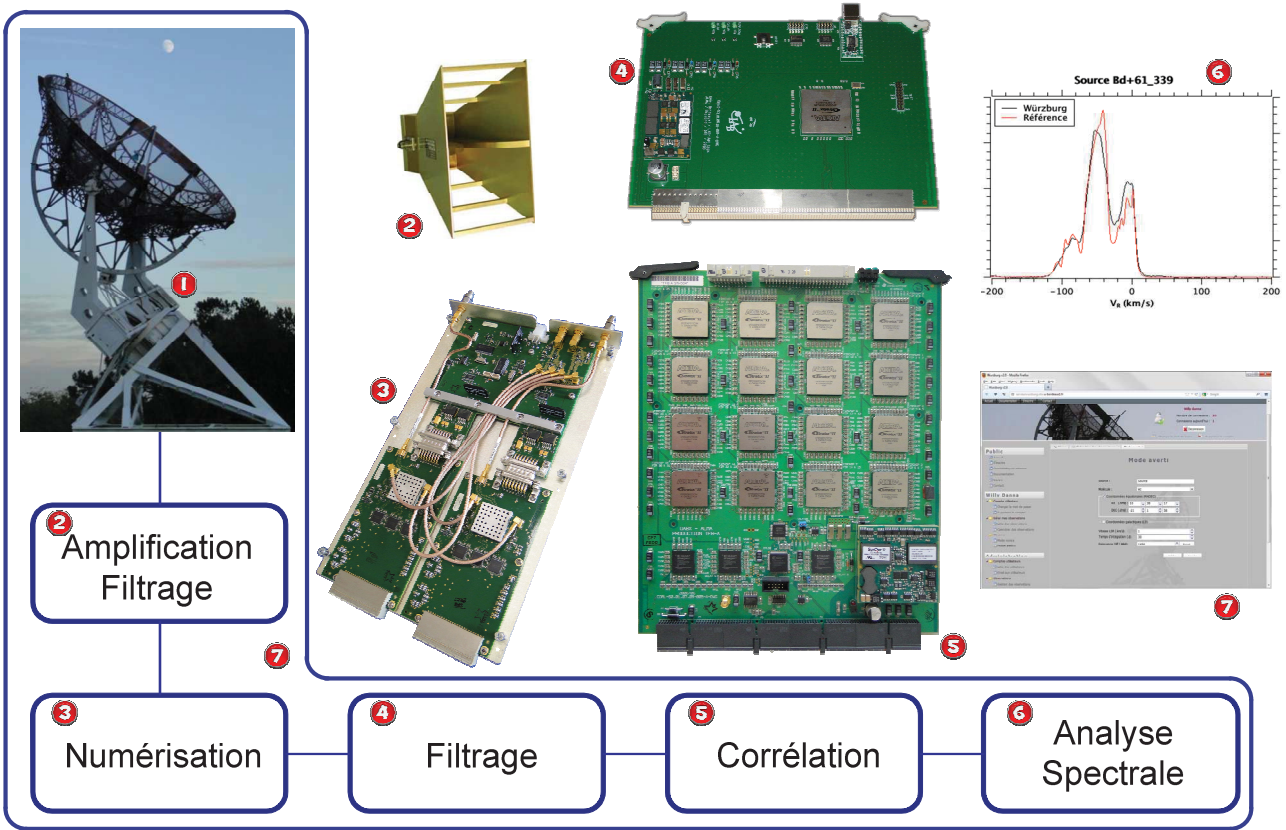


Figure 2 : synoptique du système

3.2. Antenne, caractéristiques et pointage : 1

Le radiotélescope est équipé d’une antenne parabolique de 7.5m de diamètre, sa structure permet de collecter des ondes électromagnétiques à des fréquences comprises entre 100MHz et 3GHz. L’antenne est installée sur une monture de type équatoriale ; des codeurs installés sur les deux axes permettent de donner sa position en déclinaison et en angle horaire. Les informations numériques délivrées par les codeurs et l’électronique de contrôle / commande associée sont interprétées par un programme informatique python. Ce programme réalise diverses conversions de coordonnées (équatoriales, galactiques, horaires) et communique avec l’électronique afin de réaliser le pointage et le suivi des sources astronomiques. Il estime également le temps de pointage et gère des butées logicielles et mécaniques afin de stopper l’antenne en cas d’anomalie de fonctionnement.

3.3. Système analogique radiofréquence : 2

Le radiotélescope est équipé d'un cornet 0.7-18GHz de bande passante et d'ouverture $\sim 50^\circ$ à 1.4GHz. L'électronique analogique radiofréquence est très réduite dans le cas du Würzburg. En effet, contrairement à la plupart des radiotélescopes aucun changement de fréquence par hétérodynage n'est réalisé. Ce sous-système comporte une chaîne d'amplification faible bruit permettant d'adapter la puissance du signal à l'entrée du module de numérisation (0 dBm) et un filtre passe-bande afin d'éliminer les principales interférences dues à des émetteurs de radiocommunication locaux.

3.4. Module de numérisation : 3

Le module de numérisation comporte un Convertisseur Analogique Numérique 3bits (8 niveaux) échantillonnant le signal à 2.7GHz et des démultiplexeurs 1 : 16 permettant d'adapter la vitesse des échantillons à l'entrée du système de traitement numérique du signal (16 voies à 168.75MHz). La bande numérisée correspond à la seconde fenêtre de Nyquist soit 1.35GHz – 2.7GHz.

3.5. Filtrage Numérique : 4

Le système de filtrage numérique permet d'extraire deux sous-bandes de 10MHz dans la bande 1.35GHz – 2.7GHz. Pour chaque sous-bande, cette opération est réalisée par changement de fréquence avec une résolution de 20kHz puis par filtrage passe bas (1 étage Comb et 2 étages FIR). Les 2 sous-bandes extraites simultanément permettront de réaliser une analyse spectrale de type « frequency switch », une sous-bande correspond à la fréquence ON (signal avec source) l'autre à la fréquence OFF (signal sans source) [7].

3.6. Corrélation : 5

Le système de corrélation analyse simultanément les 2 sous-bandes ON et OFF. Il est constitué de 2×2048 canaux de corrélation, la résolution spectrale est donc de l'ordre de 5kHz. Le temps d'intégration est programmable, de quelques millisecondes à plusieurs secondes. Les calculs arithmétiques internes sont réalisés sur 32 bits. Les coefficients de corrélation transmis au système informatique sont codés sur 16 bits, sélectionnés parmi les 32 bits selon le temps d'intégration choisi. Ce système réalise 96.4 milliards d'opérations (MAC) par seconde.

3.7. Programme python, diagnostic, contrôle / commande, paramétrage, post-traitement : 6 7

Ce programme python est largement multithread, il permet de contrôler entièrement l'instrument. En plus des opérations de contrôle / commande de l'antenne, le programme python permet de réaliser un diagnostic complet de l'électronique numérique, il paramètre les algorithmes de traitement appliqués par l'électronique numérique et effectue les derniers traitements mathématiques à partir des coefficients de corrélation (fenêtrage, transformée de Fourier, calibration, etc.). Toute observation distante réalisée depuis l'interface web exécute le programme python localement.

4. Application grand public

4.1. Application WEB

Une application web dynamique basée sur le langage PHP, le Framework Javascript Sencha (anciennement ExtJs) et liée à une base de données Mysql a été développée afin de permettre aux utilisateurs de réaliser des observations avec le radiotélescope Würzburg depuis n'importe quelle machine connectée à internet. Pour cela, il suffit de se connecter sur la page web du Würzburg (<http://serveurwurzburg.obs.u-bordeaux1.fr>) avec n'importe quel navigateur internet.

Une fois connecté, plusieurs possibilités s'offrent à l'utilisateur. Il est possible de réserver l'instrument par plages de quatre heures, de réaliser des observations avec le radiotélescope, de récupérer des données d'observations pour un traitement hors ligne et de visualiser la météorologie du site où est installé le radiotélescope.

Deux modes d'observation sont disponibles : le mode novice et le mode averti (Figure 3). Le mode novice est destiné aux personnes inexpérimentées. L'utilisateur ne peut choisir que le type de molécule à observer (HI ou OH) et une source astronomique parmi une liste d'objets proposés. Tous les autres paramètres d'observation sont imposés, notamment le temps d'intégration qui est fixé à 60s. Dans le mode averti, destiné aux personnes expérimentées, l'utilisateur a la possibilité de régler de nombreux paramètres d'observation. Il doit indiquer les coordonnées célestes de la source à observer en coordonnées équatoriales ou galactiques, choisir un nom pour la source à observer, sélectionner un type de molécule (HI ou bientôt OH), indiquer la vitesse LSR de la source, fixer le temps d'intégration et choisir la fréquence Off (Méthode « Frequency Switch ») [7].

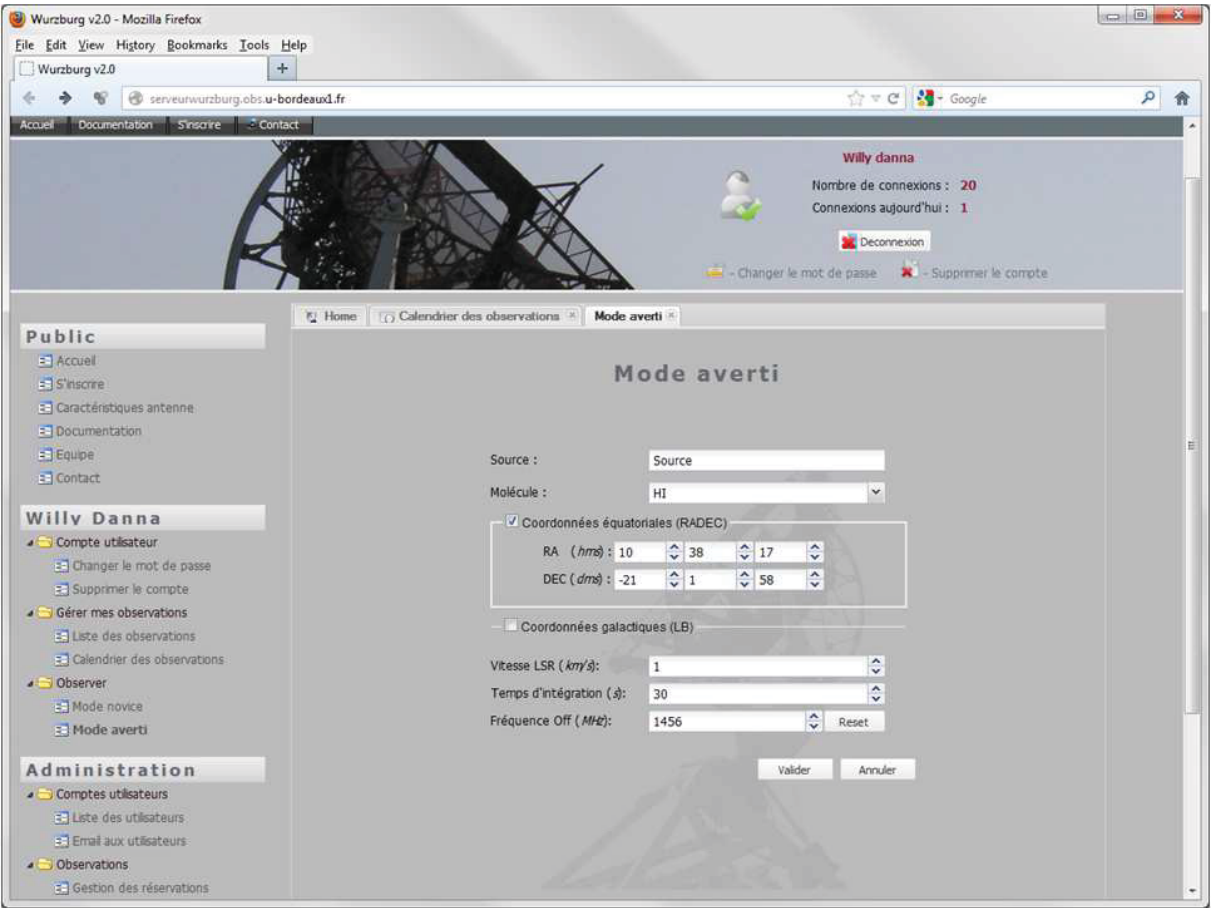


Figure 3 : interface WEB

Une fois le mode choisi et les paramètres dûment remplis, l’observation peut avoir lieu. La durée totale d’observation dépend du temps de déplacement de l’antenne et du temps d’intégration. Le temps de pointage de l’antenne peut atteindre un vingtaine de minutes. Durant la phase de déplacement de l’antenne, une carte du ciel apparait sur l’écran afin de suivre la progression de l’antenne en temps réel ; le soleil, la lune et les objets proposés en mode novice y sont également représentés. Une fois l’antenne pointée sur l’objet céleste désiré, la phase d’observation peut commencer et l’affichage du spectre instantané est alors affiché sur l’écran. De plus, l'utilisateur a la possibilité de contrôler le bon déroulement d'une observation à l'aide d'une fenêtre indiquant l'état de l'antenne et des sous-systèmes qui la composent. Lorsque l’observation est terminée, il est possible de télécharger les données numériques liées aux observations sous forme de fichiers. Il est également possible de récupérer des données antérieures à l’observation en cours, celles-ci sont stockées durant une année.

4.2. Observation et exploitation des données

Les fréquences intéressantes pour la radioastronomie et accessibles depuis le Würzburg sont listées dans le Tableau 2. Pour l’instant, seule la fréquence du HI a été utilisée, car les sources sont très brillantes. Les sources en maser OH n'ont été observées que rarement car elles nécessitent des temps d'intégration très longs (quelques heures) dans un environnement parasité.

Notation	Fréquence d'émission en MHz	
HI	1420.4	Hydrogène atomique
OH(1-2)	1612.2	Maser OH
OH(1-1)	1665.4	Maser OH
OH(2-2)	1667.4	Maser OH
OH(2-1)	1720.5	Maser OH

Tableau 2 : liste des fréquences d'intérêt

Voici à titre d'exemples, quelques sources proposées à l'observateur en mode novice (Tableau 3).

Source		
M33	HI	Extragalactique faible
W3OH	HI	Forte
Cyg A	HI	Forte
G34.3	HI	Forte
Orion A	HI	Forte
IRC+10216	OH	Non observée encore

Tableau 3 : exemples de sources observables

Une fois l'observation terminée (voir paragraphe précédent), le spectre est disponible sous forme graphique (voir Figure 4). Il est aussi possible de télécharger les données brutes sous forme texte (vitesse/intensité) ou sous format Class [6]. Ce format est beaucoup plus intéressant pour le dépouillement des données car il peut être exploité par le logiciel professionnel de traitement des spectres radio astronomiques Gildas. Après quelques opérations d'accumulation des spectres, soustraction de la ligne de base (ondulation du spectre) et élimination des parasites (liés aux interférences radio), nous obtenons un spectre exploitable pour des interprétations et études scientifiques (Figure 5).

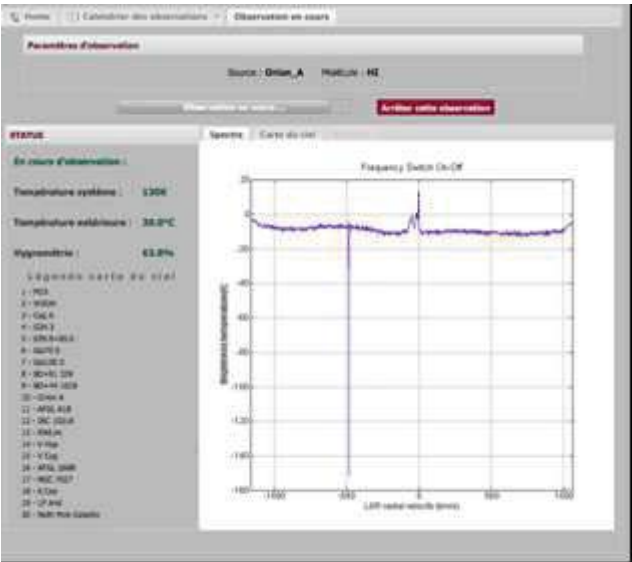


Figure 4 : spectre d'une source

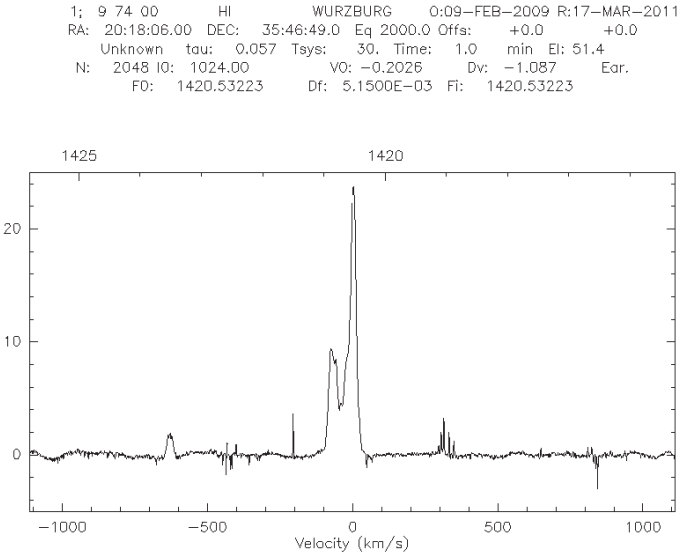


Figure 5 : spectre nettoyé sous Gildas

5. Exemple de projets pédagogiques

Depuis mai 2011, le radiotélescope permet à tout utilisateur, via internet d’observer le ciel en onde radio (plus précisément en HI), et donc par exemple de cartographier la Galaxie et d’en déterminer la courbe de rotation, grâce à quelques recettes d’observation mises en ligne. D’autres « travaux pratiques » sont en cours de développement.

Voici quelques exemples d'utilisation.

5.1. Observation du soleil pour caractériser l'antenne

Le lobe de l'antenne est théoriquement limité par la diffraction de la parabole [7]. Ceci peut être vérifié en utilisant le soleil comme source ponctuelle.

Cette expérience a été réalisée lors d'un stage à l'observatoire. Pour cela, il faut pointer à la déclinaison du soleil, légèrement à l'Ouest, arrêter l'antenne et attendre le passage du soleil. En enregistrant la puissance totale à 1420MHz à intervalle de temps régulier, il est possible de retracer le lobe de l'antenne (Figure 6).

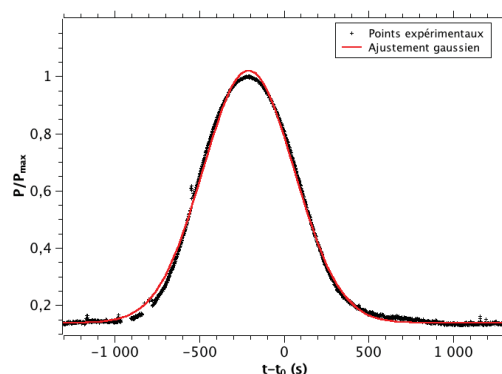


Figure 6 : mesure du transit solaire

Nous obtenons une forme en puissance de type gaussienne dont la largeur à mi hauteur peut-être mesurée en temps, puis convertie en angle. Cela nous donne un lobe de l'ordre de 2.7° en ascension droite.

Pour obtenir la même mesure en déclinaison, il faut pointer le soleil en ascension droite, enclencher le suivi de l'antenne (permettant de compenser la rotation de la terre), et mesurer la puissance à différentes déclinaisons. Le lobe mesuré est de l'ordre de 2.8° . Bien sur, cette mesure doit être corrigée de la taille apparente du soleil, qui est de l'ordre de $30''$ à cette fréquence, mais les résultats restent quasiment identiques.

Avec ces résultats, nous pouvons déduire par la formule du lobe principal d'une antenne [7] ($1.22\lambda/d$ avec λ la longueur d'onde d'observation et d le diamètre effectif de l'antenne) que la parabole est "illuminée" par le cornet au secondaire de façon uniforme mais surtout que la surface collectrice équivalente correspond à une parabole de 5m de diamètre. Compte tenu de la taille de la parabole (7.5m), il y a une perte de surface collectrice qui, dans notre cas correspond à l'angle d'ouverture du cornet qui est bien inférieure à 180° , contrairement à l'ancien dipôle installé précédemment au foyer.

Ce travail a fait l'objet d'un stage de Master au LAB.

5.2. Mesure des interférences radio

L'antenne Würzburg est installée sur le site de l'Observatoire qui se trouve maintenant en proche agglomération d'une grande ville (Bordeaux). L'environnement est donc très défavorable pour les observations radio, en particulier autour des basses fréquences. Il est ainsi possible de mesurer ces interférences afin de cartographier le site (Figure 7).

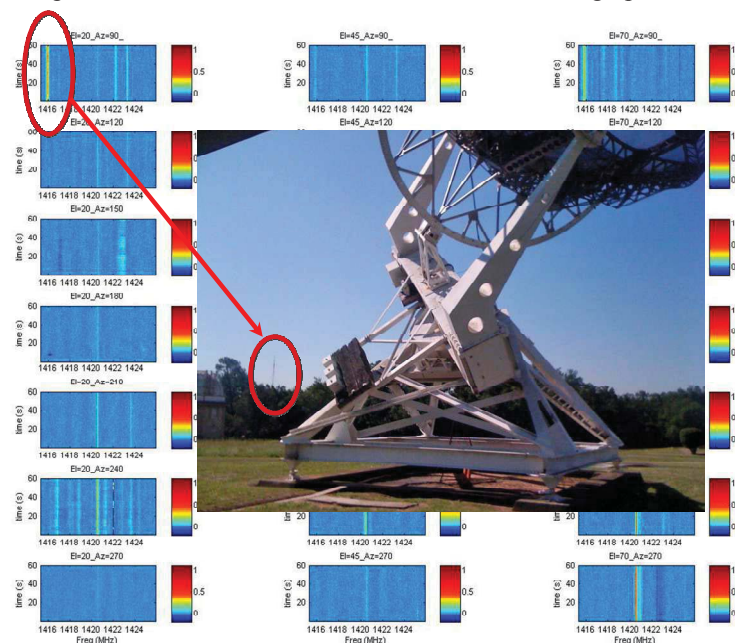


Figure 7 : exemple de mesure des interférences (émetteur TDF)

Ce travail a fait l'objet d'un stage de Master au LAB.

L'observation a été faite durant 1 minute de temps d'intégration sur la bande 1416-1426MHz en spectre ON seulement pour des élévations de 20, 45 et 90° et de 90° à 270° en azimut par pas de 30 degrés. Pour chaque observation (21 au total), cela donne un spectrogramme temps/fréquence.

Ce travail a montré qu'une partie du ciel présente des interférences radio, en particulier lorsque l'antenne est pointée en direction du pylône TDF (diffusion des ondes radio), localisé par le cercle rouge sur la Figure 7.

5.3. Cartographie de la Voie Lactée

Une partie de notre Galaxie, la Voie Lactée, est visible depuis le sol en optique, sous forme d'une traînée plus brillante dans le ciel. Mais, en raison de l'absorption du rayonnement par les nuages et la poussière, l'optique ne permet pas de tracer une carte complète de la Voie Lactée. En revanche, son observation à la fréquence de l'hydrogène atomique HI nous permet d'observer l'ensemble de la structure car la poussière n'arrête pas les ondes radio.

Ce travail a fait l'objet d'un stage de Master, en observant le HI, à différentes longitudes et latitudes galactiques.

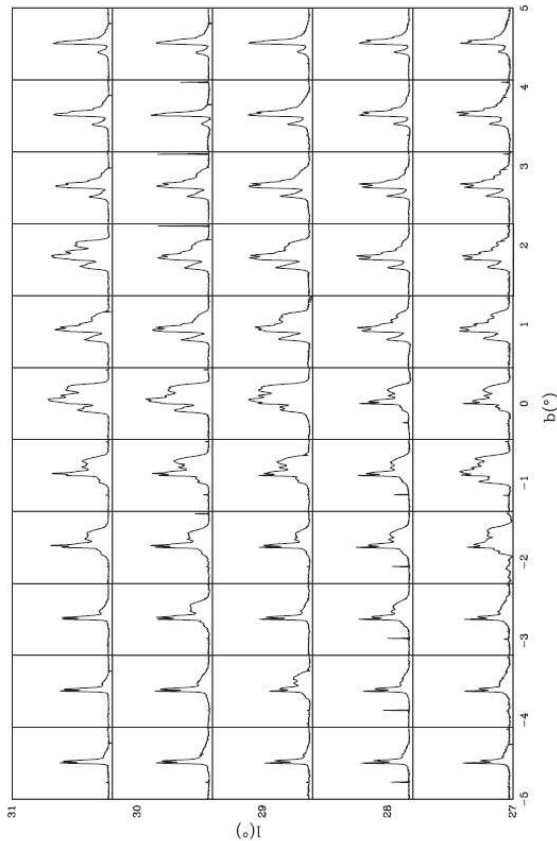


Figure 8 : exemple de carte des spectres

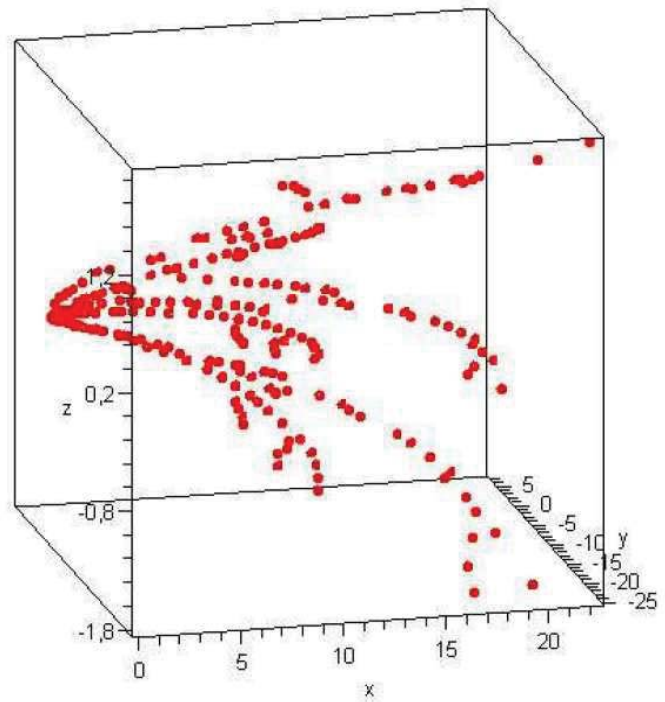


Figure 9 : reconstitution des positions des bras de la Voie Lactée

Comme expliqué dans le tutorial mis à disposition, la longitude galactique et la vitesse du bras observé, permettent de calculer la distance de ce bras par rapport au centre galactique, R , puis d'en déduire la distance du bras par rapport au Soleil. Le décalage par effet Doppler de la fréquence du signal observé (Figure 8) va nous permettre de réaliser des cartes (2D et 3D) de la Galaxie et également de tracer sa courbe de rotation (Figure 9).

Cette mesure de la vitesse de rotation permet aussi de mettre en évidence la présence de « matière noire » !

6. Conclusion

Nous avons présenté l'historique du Würzburg, puis les détails de la rénovation de l'électronique de l'instrument. Bien que "surdimensionné", cette électronique se pilote très facilement grâce au serveur Web accessible par internet. Un manuel d'utilisation, disponible en ligne, a permis à ce jour à plus d'une centaine d'utilisateurs de réaliser des projets d'observation, que ce soit dans le cadre 'amateur' ou pédagogique. Plusieurs classes de lycéens utilisent régulièrement le radiotélescope lors de séances de travaux pratiques encadrés.

Références bibliographiques

- 1- W. Orchiston, Lequeux, J., Steinberg, J.-L., and Delannoy, J., 2007. Highlighting the history of French radio astronomy. The Würzburg antennaas at Marcousis, Meudon and Nancay. *Journal of Astronomical History and Heritage*, 10(3), 221-245.
- 2- Van de Hulst's, *Ned.Tijd.Natuurkunde*, vol.11, p210, 1945
- 3- N. H. DIETER & H. I. EWEN, *Nature* 201, 279 - 281 (18 January 1964), Radio Observations of the Interstellar OH Line at 1,667 Mc/s
- 4- Quertier et al., "Le Corrélateur du radiotélescope ALMA", *Revue de L'Electricité et de l'Electronique*, n° 2012-1
- 5- see <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/sgd.html>
- 6- <http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS>
- 7- Kraus, J. D. 1966, *Radio Astronomy*, Mc Graw-Hill Book Company