

# OBSERVER LE CIEL

## RADIOASTRONOMIE AMATEUR – Observations à 21 cm

Article en 2 parties, publié dans les numéros 54 et 55 de l'Astronomie, revue mensuelle de la Société Astronomique de France (S.A.F)

Ne pas copier, reproduire ou traduire sans autorisation. Merci..

JJ MAINTOUX – F1EHN

<http://www.f1ehn.org>



### 1<sup>ère</sup> partie : A l'écoute de la Galaxie



### 2<sup>ème</sup> partie : La forme de la Galaxie



Décembre 2012

# RADIOASTRONOMES : À L'ÉCOUTE DE LA GALAXIE

Au travers d'une série de deux articles, je souhaite montrer comment une station amateur peut révéler la structure de notre Galaxie ainsi que cela a été fait par de nombreux radioastronomes durant les cinquante dernières années. Nos travaux, qui se sont étalés sur plusieurs années, montrent les possibilités de la radioastronomie amateur dans ce domaine de recherche.

Dans une première partie, nous évoquerons notre recherche documentaire sur la radioastronomie en général puis plus précisément autour de la raie de longueur d'onde 21 cm, caractéristique de l'hydrogène. La bibliographie en fin d'article indique de nombreux ouvrages ou documents qui ont été consultés. Ensuite, nous présenterons l'implication des associations AAV\* et F6KSX/ARRL\* pour la réalisation de la station, l'observation des signaux reçus et la manière de les traiter. Dans une deuxième partie, après la présentation de la dynamique des nuages d'hydrogène dans la Galaxie, nous montrerons comment les observations radio dans cette longueur d'onde de 21 cm permettent de percevoir et mettre en évidence cette dynamique, nous présenterons nos résultats et de futurs essais envisagés.

\* - AAV: Association astronomique de la vallée, située à Orsay : <http://aav-astro.fr>  
F6KSX/ARRL - la station radio des Amateurs de Réflexions Radioélectriques sur la Lune : <http://www.f1ehn.org>

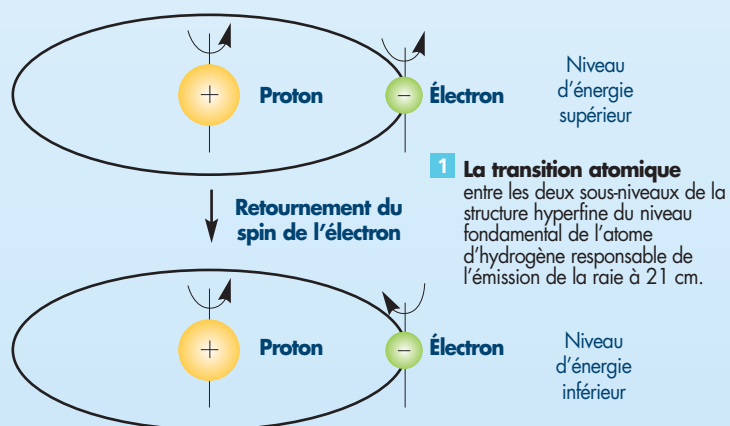
## La radioastronomie et la raie à 21 cm

### ● Début de la radioastronomie

On peut faire remonter la naissance de la radioastronomie à la découverte de Karl Jansky, qui mit en évidence, en 1932, que notre Galaxie émettait des ondes radio. Le signal le plus intense provenait du centre de la Voie lactée, dans la constellation du Sagittaire. Sa découverte fut rendue publique, notamment dans le *New York Times* du 5 mai 1933. Jansky en avait déduit que ce rayonnement radio devait provenir de nuages de gaz et de poussières interstellaires présents dans notre Galaxie.

Cependant, la radioastronomie ne se développera qu'après la Seconde Guerre mondiale en particulier avec l'invention du radar.

Par la suite, les travaux du célèbre astronome néerlandais Jan Oort mirent en évidence une fenêtre d'observation des ondes radio et ce dernier imagina que la présence d'une raie spectrale dans le domaine radio serait un outil important pour découvrir la structure de notre Galaxie. En effet, Oort avait compris que les ondes radio peuvent traverser les nuages de poussières, alors que ces derniers absorbent la lumière des étoiles et de ce fait perturbent fortement les observations optiques.



## ● Prédiction de la raie à 21 cm

Les travaux théoriques continuèrent principalement autour de l'hydrogène, élément le plus abondant dans l'Univers. En 1944, H.-C. van de Hulst, élève de Jan Oort, prédit par le calcul la présence d'une raie spectrale au niveau de la structure hyperfine de l'atome d'hydrogène neutre (désigné par HI ou H1).

Van de Hulst montra que le niveau fondamental de l'atome d'hydrogène se décompose en 2 sous-niveaux d'énergie résultant de l'interaction magnétique entre le spin de l'électron et celui de son proton. Quand l'atome passe du niveau d'énergie supérieur (spins parallèles) au niveau inférieur (spins antiparallèles), il émet un photon à la longueur d'onde de 21 cm qui correspond à la différence d'énergie entre ces deux niveaux (fig. 1).

Cette transition atomique entre ces deux niveaux a une très faible probabilité de se produire : un atome d'hydrogène dans le niveau supérieur mettra plusieurs millions d'années à tomber spontanément au niveau inférieur. Malgré cela, le nombre d'atomes d'hydrogène dans l'Univers, et en particulier dans le milieu interstellaire, est tel que cette transition est souvent observée. De plus, les collisions entre atomes d'hydrogène favorisent cette transition. De la même manière, la probabilité de collision est extrêmement faible, mais le nombre d'atomes présents est suffisamment grand pour qu'au total, le nombre de transitions soit important et donc que la raie spectrale émise présente une intensité non négligeable.

## ● Mise en évidence et exploitation de la raie à 21 cm

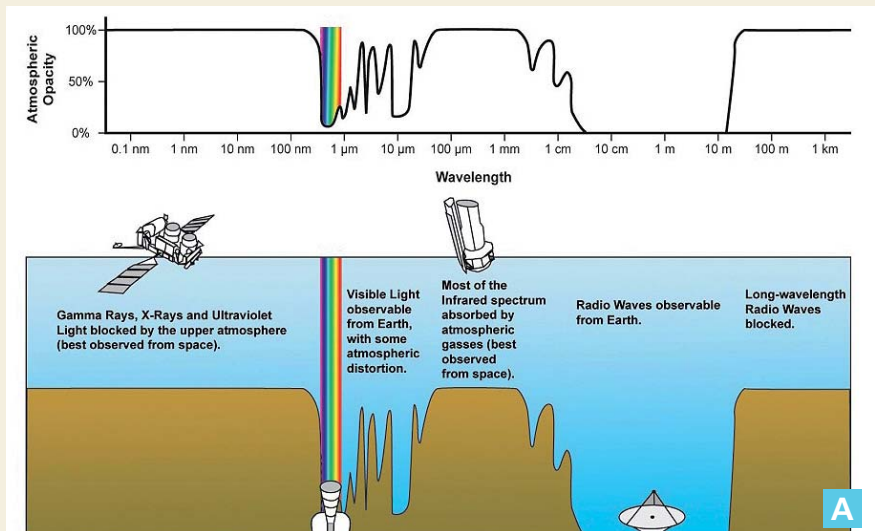
La raie de longueur d'onde 21 cm fut finalement observée en radio par Harold Ewen et le Prix Nobel Edward Purcell en mars 1951. Oort avait alors imaginé que, grâce à cette raie spectrale, il serait possible de mettre en évidence les mouvements du gaz hydrogène par étude de l'effet Doppler, ce qui permettrait ensuite d'étudier la distribution de nuages de gaz dans la Voie lactée.

Aujourd'hui, la raie à 21 cm de l'hydrogène neutre est toujours un thème de recherches et de travaux en astrophysique. D'immenses antennes ont vu le jour à travers le monde, permettant l'observation de cette raie pour étudier différentes galaxies et régions de l'Univers. Ces antennes sont même interconnectées pour obtenir de très grandes résolutions dans le cadre de projets comme eVLBI (Electronic Very Large Base Interferometer) et JIVE (Joint Institute for VLBI in Europa). Le radiotélescope Lofar (Low Frequency Array) installé aux Pays-Bas est précurseur du projet grandiose Square Kilometre Array (SKA) auquel est associée la station française de Nançay. Avec cette nouvelle génération de radiotélescopes, il sera possible d'écouter des sources très lointaines, ce qui permettra de mieux comprendre la période du début de l'Univers et de répondre à l'attente des cosmologistes. Ces projets mettent en œuvre des moyens considérables avec des antennes de très grandes dimensions et très nombreuses, des systèmes informatiques de traitement très puissants et interconnectés, avec des moyens de stockage gigantesques.

# Quelques rappels à propos des ondes radio

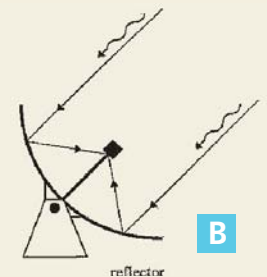
**PROPAGATION** – Tout comme la lumière, les signaux radio sont des ondes électromagnétiques, caractérisées par leur longueur d'onde ( $\lambda$ ) ou par leur fréquence ( $f$ ), avec  $\lambda = c/f$  où  $c$  est la vitesse de la lumière ( $c = 299\,792\,458$  m/s). Pour une source d'hydrogène immobile, la fréquence  $f_0$  de la raie d'hydrogène neutre (H1) émise est de 1 420 MHz, d'où la valeur de la longueur d'onde de cette raie H1 : 21,1 cm (raie « 21 cm » a été retenue pour son appellation).

Cette longueur d'onde se situe à l'intérieur d'une fenêtre « radio » dans l'atmosphère mise en évidence par Jan Oort et ses successeurs. À cette longueur d'onde, les signaux traversent les nuages de poussières de la Voie lactée, notre Galaxie, avec peu d'affaiblissement, et ils ne sont pas arrêtés par l'atmosphère terrestre.



**RÉCEPTION** – Les mêmes lois s'appliquant à toutes les réceptions d'ondes électromagnétiques, la sensibilité d'un radiotélescope est proportionnelle au carré du diamètre de son antenne ( $D^2$ ) et sa résolution angulaire est proportionnelle au rapport de la longueur d'onde au diamètre de l'antenne ( $\lambda/D$ ).

Pour comparaison, en optique, la pupille humaine a une résolution de 1 minute d'arc car  $\lambda = 10^{-3}$  mm et  $D = 5$  mm. Pour obtenir la même résolution à la longueur d'onde de 21 cm, il faudrait utiliser un réflecteur de 700 m de diamètre. Un réflecteur de 30 m présente une résolution de 30'. La figure C montre l'équivalent optique de cette comparaison (montage effectué par l'IRARef (6)).



**EFFET DOPPLER** – Si la distance entre la source émettrice et le récepteur varie, comme c'est précisément le cas entre les nuages d'hydrogène de la Galaxie et un observateur terrien, la fréquence observée est décalée par rapport à  $f_0$ . Ce décalage de fréquence, appelé effet Doppler, s'écrit  $\Delta f = f - f_0$ . Ce décalage dépend de la vitesse de la source émettrice dans la direction d'observation de la raie, c'est-à-dire de la vitesse radiale, soit  $v = -\Delta f \times \lambda$ . Il est alors possible, en mesurant  $\Delta f$  et connaissant  $\lambda$ , de déduire la vitesse radiale relative de déplacement,  $v$ , de la source. Notons que  $v$  est positif si la source s'éloigne et négatif si la source se rapproche.

C'est ainsi que l'observation du décalage de la raie à 21 cm émise par un nuage d'hydrogène dans la Galaxie pourra renseigner sur la vitesse radiale de déplacement de ce nuage. C'est ce que nous montrerons dans la deuxième partie de l'article.

### ● Quels objectifs pour la radioastronomie à 21 cm ?

Évidemment, dans ce domaine exploré par des professionnels depuis plus de 50 ans, il n'est pas question pour l'amateur de penser à une quelconque découverte. Sa démarche est plus orientée vers la découverte pratique de la radioastronomie, la mise en évidence de la raie à 21 cm, la compréhension de cette découverte majeure et la diffusion de ces connaissances, dans le cadre d'associations et au travers de conférences ou de présentations. Dans le cadre scolaire, des expériences simples de radioastronomie ont été mises en place, par exemple par l'association Eu-HOU (5).

Afin de mieux appréhender les techniques de l'observation de la raie d'hydrogène neutre à 21 cm, notre recherche documentaire a porté sur des descriptions aussi précises que possible afin de parfaitement dimensionner la station amateur de radioastronomie que nous décrivons plus loin. Parmi les documents facilement disponibles et grâce à Internet, devenu incontournable dans cette démarche, le document présenté en référence 1 retrace les travaux effectués par Jan Oort et son équipe en 1954. Il décrit les moyens mis en œuvre ainsi que les méthodes employées pour relever les différentes informations nécessaires pour mettre en évidence la structure de notre Galaxie. Bien sûr, les matériels employés ont considérablement évolué et l'utilisation d'une antenne petite comme la nôtre est en partie compensée par la plus grande sensibilité du récepteur et par les possibilités de traitement modernes ainsi que la stabilité des mesures effectuées. Ces différents points techniques sont présentés plus loin dans l'article.

### ● Quels moyens pour atteindre les objectifs ?

L'objectif étant de mettre en évidence les mouvements des nuages d'hydrogène H1 dans la Galaxie, le récepteur de radioastronomie à 21 cm devra d'abord détecter le signal radio à 21 cm pour pouvoir ensuite effectuer la mesure du décalage Doppler et ainsi restituer la vitesse avec une grande précision. L'amplitude du signal reçu est une information supplémentaire permettant d'estimer la quantité d'hydrogène interceptée par notre antenne.

Dans une direction de visée, les nuages d'hydrogène qui vont être détectés sont tous dans le même alignement. On comprend alors que pour cette expérience la résolution de mesure nécessaire n'est pas prioritairement angulaire (liée à la dimension de l'antenne comme le montre l'encadré page précédente) mais principalement fréquentielle, permettant ainsi de distinguer des nuages se déplaçant à des vitesses relatives différentes. C'est aussi pour cette raison que cette expérience est réalisable par une station amateur ne pouvant pas disposer facilement d'une antenne de grande dimension. Malheureusement, la dimension d'antenne de la station amateur, non seulement limite la résolution angulaire, mais aussi réduit sa sensibilité et limite ainsi son utilisation à l'étude de la raie 21 cm dans notre Galaxie.

D'autres galaxies plus lointaines ne seront pas accessibles car leurs rayonnements seront trop faibles et donc non détectables. La radioastronomie amateur étant assez peu développée en France, pour cette première expérience entre amateurs il a été nécessaire de mettre en commun des moyens. C'est ainsi que ce projet de radioastronomie est né en rapprochant deux associations: pour la radio le club F6KXS/ARRL et pour l'astronomie le club AAV. L'Association astronomique de la vallée a donc accueilli sur son site d'Orsay la station radio des Amateurs de Réflexions Radioélectriques sur la Lune (fig. 2). Celle-ci est parfaitement utilisable pour le projet 21 cm, avec son système de positionnement (rotation 2 axes) et le réflecteur parabolique de 3,3 m. Ce dispositif de rotation prévu pour poursuivre la Lune en utilisant notre satellite comme réflecteur de signaux radio (liaisons EME, Earth Moon Earth) est même surdimensionnée pour nos besoins.



## Réalisation d'une station amateur d'observation de la raie 21 cm

### ● L'antenne

La source (terme consacré en radio qui désigne l'équivalent de l'oculaire dans un instrument d'optique) est placée au foyer du réflecteur parabolique et elle est adaptée à la courbure de la parabole (fig. 3). Elle a pour rôle principal de convertir les ondes électromagnétiques captées par le réflecteur en un courant électrique à 21 cm (ou 1 420,4 MHz).

Le préamplificateur (LNA) est directement raccordé à la source. Son rôle est d'amplifier le signal radioélectrique avec un minimum de pertes. Cette précaution permet de garantir la sensibilité de la station de radioastronomie.

La sensibilité est définie par la « température de bruit » appelée également « température système » (Tsys), et sa valeur inclut deux contributeurs:

- **Une partie fixe** dépendant de la conception du récepteur: l'optimisation consiste à utiliser un LNA à faible température ou facteur de bruit et une liaison à faible perte entre la source et le LNA.

- **Une partie variable:** la température d'antenne (Tant) qui dépend de la direction visée par l'antenne et de ses performances. Les facteurs influant sont essentiellement: le fond diffus cosmologique, le rayonnement galactique, l'atmosphère terrestre et l'environnement immédiat comme le sol et les bâtiments. À ces températures de bruit dites « parasites » s'ajoute la température de bruit de la radiosource ou source galactique visée que l'on souhaite détecter et observer. La température d'antenne s'exprime en kelvin, comme une température thermique.

### ● Le récepteur et l'oscillateur local

Le récepteur est accordé sur la longueur d'onde de 21 cm, soit une fréquence de 1 420 MHz, grâce à l'oscillateur local (OL). Ce dernier est utilisé pour effectuer la transposition de la fréquence (RF) vers une fréquence intermédiaire (FI) telle que  $FI = RF - OL$ . Cette fréquence choisie plus basse, ici 60 MHz, permet:

- de véhiculer les signaux du récepteur vers le traitement avec une atténuation réduite,
- d'effectuer un filtrage plus sélectif adapté à la bande d'intérêt,
- de numériser des signaux avec des technologies abordables par l'amateur.

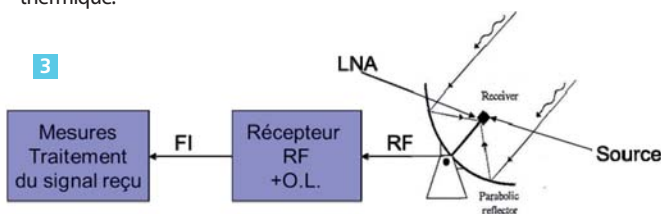
### ● Le traitement des signaux numériques

Après numérisation, les signaux sont traités pour assurer la détection et l'affichage des résultats. La numérisation et le traitement sont assurés par un PC, outil désormais indispensable dans une station de radioastronomie. Il assure également le pointage en temps réel de l'antenne vers la radiosource ou une zone de la Galaxie que l'on souhaite étudier.

Comme nous l'avons vu précédemment, une partie de la sensibilité de la station est déterminée par le diamètre de l'antenne (son gain) et la température de bruit de son système. Avec une antenne parabolique de diamètre 3,3 m, l'angle d'ouverture HPBW est de 4,4° et, dans notre cas, la température système est de 60 K.

Ces performances seules ne suffisent pas à détecter le signal de la raie d'hydrogène H1. En effet, d'après la « littérature » (1), les signaux reçus à 21 cm en provenance de notre Galaxie sont de l'ordre de 10 à 100 K. Un traitement doit donc être effectué pour détecter puis visualiser les signaux reçus.

D'une manière empirique, si l'on souhaite obtenir un résultat satisfaisant, la sensibilité de détection de la station doit être de l'ordre du 1/100 du niveau de signal reçu. Les vitesses doivent pouvoir être mesurées dans un domaine de +/-200 km/s et comme pour la sensibilité, la vitesse doit



être mesurée avec une certaine résolution. Celle-ci est prévue de l'ordre de 0,2 km/s afin de restituer des mesures avec une précision meilleure que 0,5 km/s. Aujourd'hui, un procédé mathématique permet d'effectuer cette transformation simplement, il s'agit de la transformée rapide de Fourier ou FFT (Fast Fourier Transformer). En résumant, une FFT à N points convertit N échantillons temporels en N canaux fréquentiels répartis uniformément entre  $-Fe/2$  et  $+Fe/2$ , Fe étant la fréquence d'échantillonnage ou de numérisation. Notre FFT sera donc dotée de 2048 points avec une  $Fe = 2,5$  MHz. Remarque: il y a de nombreuses années (1), cette conversion était effectuée en faisant varier la fréquence du récepteur (ou de son oscillateur local) et l'on relevait ainsi le niveau du signal reçu en fonction de la fréquence. Il fallait effectuer autant de mesures que la résolution Doppler le nécessitait et donc limiter les expériences à cause du temps de mesure et des dérives du matériel. Par la suite, des récepteurs possédant un grand nombre de filtres Doppler puis des corrélateurs sont apparus.

Ces différentes contraintes conduisent donc aux caractéristiques suivantes pour l'acquisition des données:

- Sensibilité nécessaire à 21 cm: 1 K pour un signal de 100 K (valeur typique pour notre Galaxie).
- Bande passante utile: 2 MHz soit env +/- 200 km/s à 21 cm ( $\Delta f = -v/\lambda$ ).
- Résolution vitesse:  $\lambda \times Fe/2048$  points FFT soit environ 0,25 km/s.

La sensibilité de détection (Sd) également appelée sensibilité radiométrique (8) est donnée par la formule:

$Sd = T_{sys}/\sqrt{Bw \times T}$ . Avec  $T_{sys} = 100$  K,  $Sd = 1$  K,  $Bw = Fe/N = 1220$  Hz, on en déduit alors un temps d'intégration (ou d'observation) nécessaire  $T = 8$  s. Ce temps d'intégration T de l'ordre de 8 s devrait donc permettre d'obtenir une sensibilité de mesure de 1 K et une résolution sur la vitesse de 0,25 km/s dans un domaine utile de +/-200 km/s.

À partir des données enregistrées, le traitement va calculer un grand nombre de FFT (plusieurs milliers correspondant à 8 s

d'observation). La moyenne du module de ces FFT est effectuée, point par point (ou canal élémentaire par canal élémentaire). Le bruit de nature aléatoire est alors moyenné et le signal recherché est alors détectable. Toutefois, ce signal brut présente de nombreuses imperfections provenant en

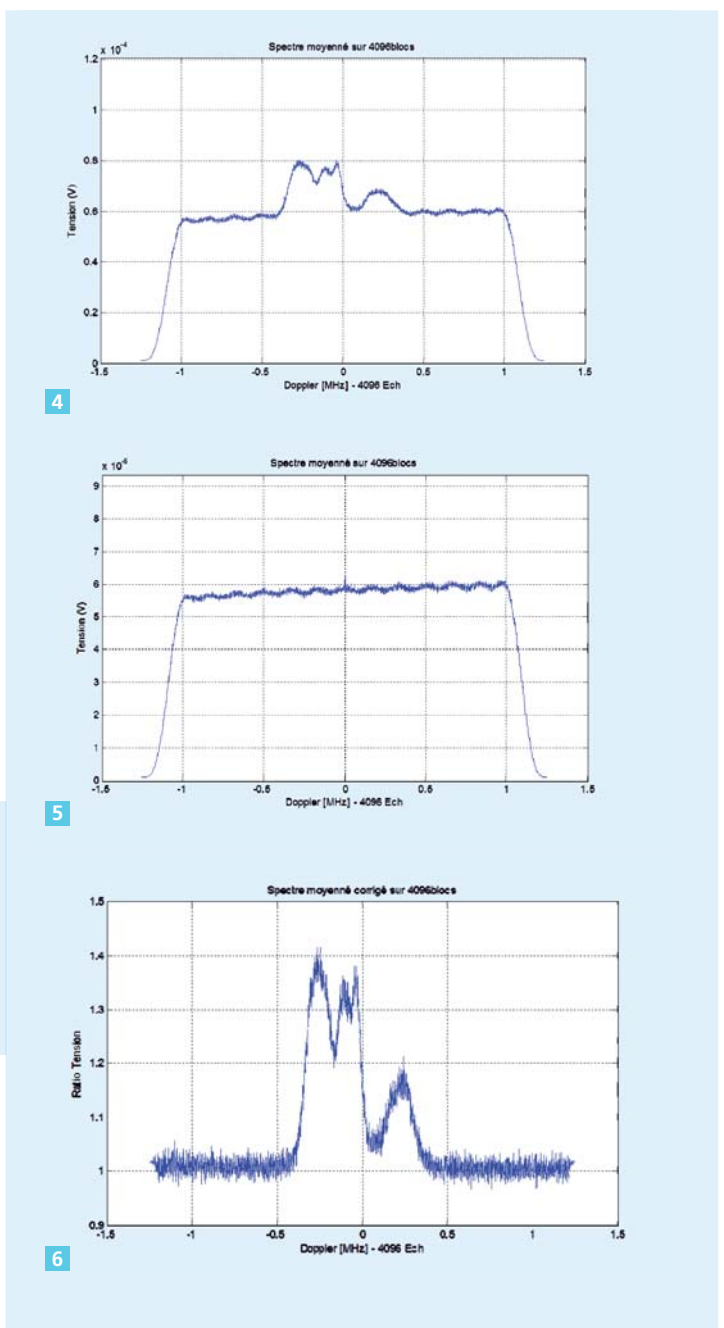
grande partie des imperfections du récepteur. Ces imperfections peuvent être corrigées par l'utilisation d'un signal de référence. En effet, en appliquant la règle de la double pesée, c'est-à-dire une mesure comportant « le signal H1 + les imperfections du récepteur + les signaux à spectre large de la galaxie » et une seconde mesure ne comportant que « les imperfections du récepteur + les signaux à spectre large de la galaxie », on peut ainsi obtenir le signal H1 en effectuant la différence de ces mesures.

### ● Utilisation d'un signal de référence

L'utilisation d'un signal de référence est l'équivalent des opérations « dark » et « flat » dans le cas du traitement informatique d'images optiques. Deux règles principales sont à prendre en compte pour enregistrer un signal de référence. Ce dernier ne doit pas contenir de signal correspondant à H1 et la température de bruit de référence doit être représentative de la température de bruit présente dans la direction de visée (direction de la source à étudier). Or, comme on a pu le voir précédemment, deux difficultés apparaissent tout de suite: l'hydrogène H1 est présent dans une très grande partie du volume observable et la température de bruit du système dépend de la position d'antenne (sol, environnement, rayonnement de la Galaxie). Pour ces deux raisons principales, la solution (également utilisée par les radioastronomes professionnels) consiste à effectuer un décalage en fréquence (offset fréquentiel) afin de ne pas recevoir de signal de la raie d'hydrogène. Le décalage effectué est minimal afin que le récepteur conserve une réponse identique à celle que l'on veut corriger et la température du ciel reste stable. On obtient alors 1 signal reçu de H1 (fig. 4) et 1 signal de référence (fig. 5). En effectuant le rapport entre les 2 mesures, on obtient le graphe de la figure 6.

La réponse est désormais plane et exempte d'ondulations parasites. Nous obtenons donc un spectre à 21 cm ayant un niveau de signal variant en fonction du décalage Doppler (décalage en fréquence) mesuré avec une bonne précision. On voit sur le graphe de la figure 7 plusieurs pics qui indiquent des décalages positifs et négatifs. L'amplitude de ces signaux n'est, par contre, pas encore étalonnée.

4. Signal reçu de H1. – 5. Signal de référence. – 6. Signal résultant du rapport des deux signaux H1 et de référence. Sur ce graphe, l'effet Doppler est révélé: s'il n'existait pas (ou s'il est nul), le graphe se limiterait à un pic centré sur le zéro de la graduation.



### ● Normalisation de l'amplitude des signaux

Deux méthodes existent principalement pour effectuer cette normalisation:

● **Utilisation d'un générateur:** c'est ce qu'utilisent les professionnels. Le récepteur est aiguillé vers un générateur étalonné et maîtrisé (stable). En effectuant une double mesure, générateur allumé puis éteint, il est alors possible de définir la réponse du récepteur.

● **Utilisation du Soleil:** c'est la solution du « pauvre » amateur. Le flux solaire est relevé chaque jour à différents endroits du globe. Ces mesures sont accessibles via Internet. Connaissant la surface effective de l'antenne et la bande passante du récepteur, il est alors possible de connaître la puissance du signal reçu capté par notre système lorsque l'antenne est orientée vers le Soleil (équivalent au générateur allumé). La référence est effectuée en orientant l'antenne vers une zone froide connue du ciel (proche des pôles galactiques par exemple). On obtient alors une double mesure et il est possible de définir la pente de conversion du récepteur passant par ces 2 points, le récepteur étant parfaitement linéaire.

Après cette normalisation, effectuée avant chaque série de mesures, le récepteur délivre des signaux directement calibrés en température d'antenne (K), l'unité utilisée en radioastronomie. Cette information pourra permettre de remonter à la connaissance de la masse d'hydrogène concernée.



### ● Correction de l'effet Doppler lié à la mécanique céleste

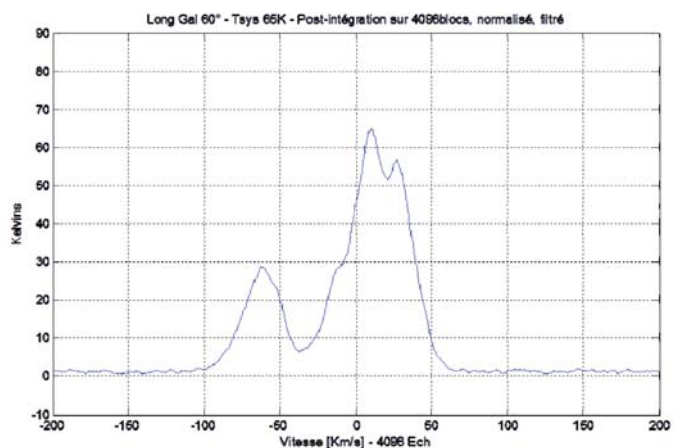
La même mesure effectuée à deux dates différentes peut donner des résultats différents. En effet, les vitesses mesurées (liées au décalage Doppler) sont affectées de variations liées aux différents mouvements de la mécanique céleste (déplacements du Soleil et de la Terre). On constate que le déplacement du Soleil dans la Galaxie (de l'ordre de 20 km/s), la rotation de la Terre autour du Soleil (de l'ordre de 30 km/s) et la rotation terrestre (environ 0,5 km/s) sont les principales causes de ce décalage. Pour corriger ces déplacements, un logiciel de calcul de correction Doppler a été réalisé. Il existe également des outils sur Internet permettant d'effectuer ces calculs à partir de notre position géographique, de l'heure, de la date et de la direction visée. J'ai commencé mes essais avec VLSR Calculator. La mesure est alors corrigée par un décalage fréquentiel du spectre relevé.

### ● Filtrage et lissage du spectre

Un filtre numérique passe-bas permet d'éliminer les petites variations rapides du signal provenant du bruit de mesure. Ce bruit aurait pu être réduit en augmentant le temps d'intégration et donc le temps de mesure. La représentation finale du signal (graphe de la *figure 7*) répond aux contraintes signalées au début, à savoir : une mesure de vitesse comprise entre +/- 200 km/s avec une résolution de 0,25 km/s et un signal défini par la température d'antenne exprimée en K avec une résolution de l'ordre de 1 K. La présentation en vitesse radiale est effectuée en multipliant les fréquences par la longueur d'onde (rappel :  $v = -\Delta f \times \lambda$  avec  $\lambda = 0,21$  m). On voit déjà sur cet exemple d'une mesure à une longitude galactique de 60° que des masses d'hydrogène se déplacent à des vitesses importantes et différentes...

Dans la deuxième partie de cet article nous montrerons comment il est possible de tirer parti des données obtenues pour mettre en évidence la position et la dynamique des nuages d'hydrogène de la Galaxie.

J.-J. Maintoux ■



7

**Spectre définitif obtenu, après traitements, à la longitude galactique de 60°.**

#### Bibliographie

1. « The spiral structure of the outer part of the Galactic System derived from the hydrogen emission at 21 cm wavelength », <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1954BAN....12..117V/0000117.000.html>
2. Page « Radiostro » de J.-J. MAINTOUX : <http://www.f1ehn.org>
3. Futura-Sciences : « La raie à 21 cm : une clé pour l'astrophysique, la cosmologie et Seti » par Laurent Sacco [http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/physique-1/d/la-raie-a-21-cm-une-cle-pour-lastrophysique-la-cosmologie-et-seti\\_27588/](http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/physique-1/d/la-raie-a-21-cm-une-cle-pour-lastrophysique-la-cosmologie-et-seti_27588/)
4. Wikipédia : « Raie 21 cm » [http://fr.wikipedia.org/wiki/Raie\\_%C3%A0\\_21\\_centim%C3%A8tres](http://fr.wikipedia.org/wiki/Raie_%C3%A0_21_centim%C3%A8tres)
5. « Voie Lactée » [http://fr.wikipedia.org/wiki/Voie\\_lact%C3%A9e](http://fr.wikipedia.org/wiki/Voie_lact%C3%A9e)
6. Hands on Universe & Onsala Space Observatory : Radioastronomie « à portée de main » : cartographie de la Voie lactée <http://www.fr.euhou.net/index.php>
7. Observatoire de Medicina - Italie : Extraits de « Technical developments » à IRA-INAF [http://www.med.ira.inaf.it/index\\_EN.htm](http://www.med.ira.inaf.it/index_EN.htm)
8. Techno-Sciences : Corps noir <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3265>
9. La radiométrie <http://radiometrie.free.fr/l-A.htm>
10. Radioastronomie (2nd edition) par John D. Kraus.
11. « Radio Astronomy with the 21 cm Hydrogen Line at the International Space University » : (Joachim Köppen) <http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~koeppen/Haystack/index.html>
12. Remerciements à Joachim Köppen
11. Unité astronomique-Parsec : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Parsec>
12. Observatoire de Paris-Meudon/Cours d'astronomie - <http://aramis.obspm.fr/~combes/fcombes/cours-astro/index.html>

## RADIOASTRONOMES

LA FORME  
DE LA GALAXIE

Dans une première partie publiée dans le numéro 54 de *l'Astronomie*, nous avons présenté la station de radioastronomie conçue pour détecter et traiter les signaux reçus des nuages d'hydrogène neutre en mouvement dans notre Galaxie. Nous allons maintenant montrer quels sont ces principaux mouvements, et comment nous pouvons remonter de l'analyse du signal, à la mise en évidence de cette structure.

## La dynamique des nuages d'hydrogène dans la Galaxie

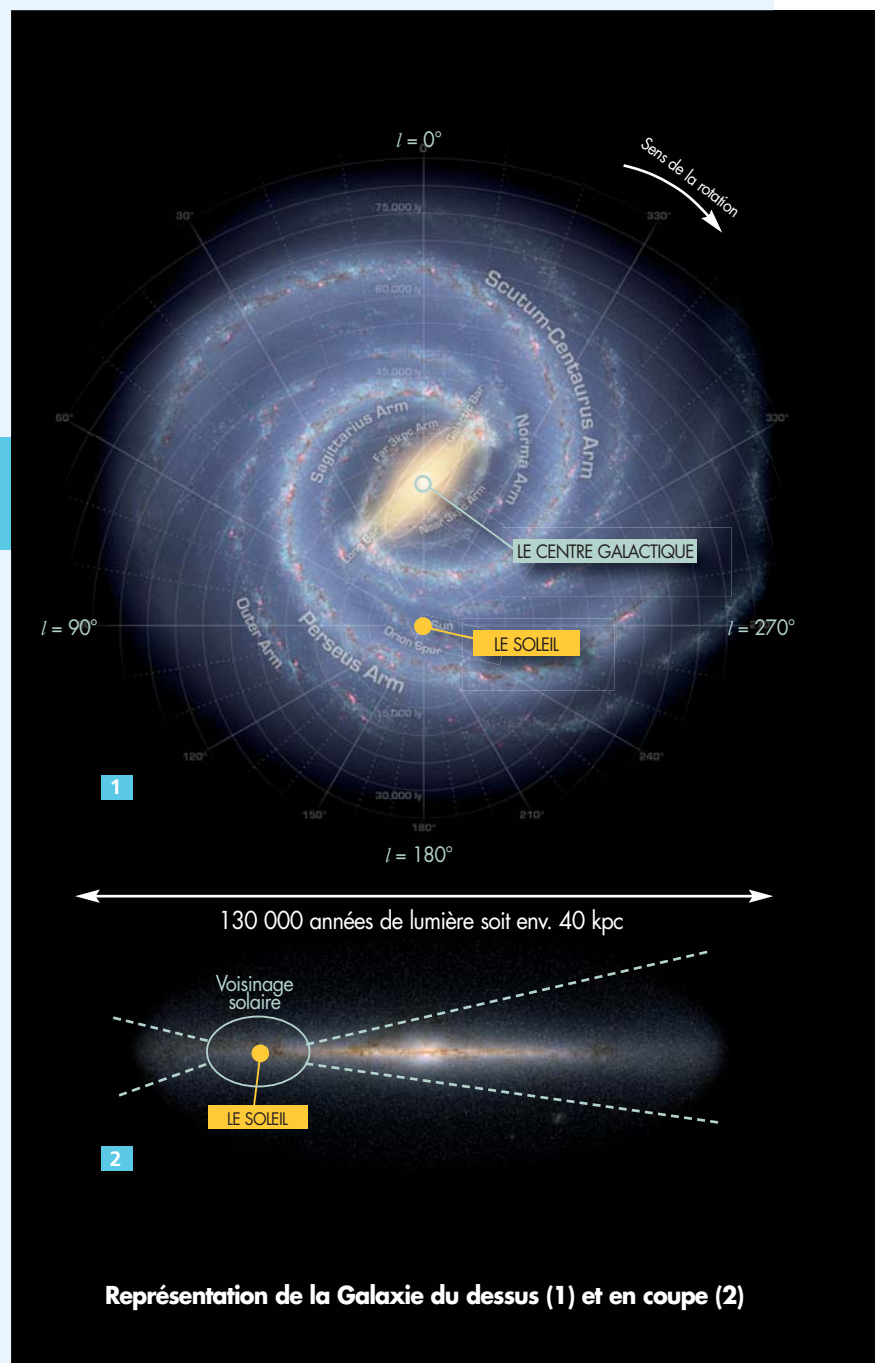
L'hydrogène est l'élément le plus abondant dans l'Univers et les nuages de gaz interstellaires, où naissent les étoiles, sont essentiellement constitués d'atomes d'hydrogène. Environ 10 % de la masse de notre Galaxie est sous forme d'hydrogène atomique, qui se trouve principalement dans un disque mince en rotation avec les étoiles autour du centre galactique. C'est ce disque que nous allons observer à l'aide de la station de radioastronomie.

## ● La forme de notre Galaxie

La connaissance de la forme de la Galaxie est issue de l'observation (optique et radio) d'autres galaxies, et aussi de simulations et de mesures effectuées en radioastronomie comme celles que nous décrivons ici. Mettre en évidence la forme de notre Galaxie est donc un grand moment même si nous y sommes préparés...

Où sommes-nous ? Sur la vue d'artiste représentant notre Galaxie (fig. 1), on a indiqué notre position (en orbite autour du Soleil) et les premiers éléments nécessaires à l'observation, en particulier  $l =$  longitude galactique, équivalente à notre longitude terrestre mais dans le plan de la galaxie. Ce plan correspond à la latitude galactique  $0^\circ$ . Le sens de rotation de la galaxie autour de son centre est indiqué. Les dimensions sont considérables, environ 130 000 années de lumière ou 40 kpc (11).

L'observation se fait dans le plan galactique, donc à la latitude galactique  $0^\circ$  comme le montre le dessin de la Galaxie vue en coupe (figure 2), où l'on remarque le bulbe galactique dans la partie centrale.

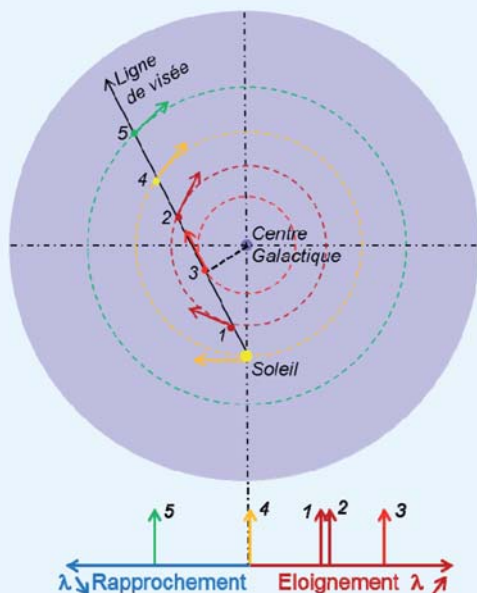


### ● L'observation depuis l'intérieur de la Galaxie

La figure 3 montre schématiquement la structure de notre Galaxie avec certaines hypothèses de mouvement et de position de nuages H1 (numérotés de 1 à 5) situés le long d'une ligne de visée correspondant à la direction de notre antenne. À cause de la rotation de notre Galaxie autour du centre galactique (dans le sens des aiguilles d'une montre), à chaque direction d'observation correspond une région de H1 possédant une vitesse relative particulière.

Sur le schéma de la figure 3, chaque petit vecteur dessiné dans le disque représente la vitesse ( $V_{H1}$ ) et donc la direction de déplacement du nuage d'hydrogène situé à chacun des points de 1 à 5 et de même pour le déplacement du Soleil ( $V_0$ ). Leur vitesse radiale vue de la station correspond à la projection de ces vecteurs sur la ligne de visée de l'antenne. La vitesse radiale relevée par la station ( $V_r$ ) est la différence entre la vitesse radiale du nuage de gaz H1 et la vitesse radiale du déplacement du Soleil (donc de la station) dans cette direction. Nous pouvons alors écrire, en chaque point:  $V_r = \text{proj. } V_{H1} - \text{proj. } V_0$ .

Ainsi, on comprend que le point 4, situé à égale distance du centre de la Galaxie que le Soleil, a une vitesse radiale résultante nulle. Le point 3, dont la vitesse est tangentielle à la ligne de visée, a donc une vitesse radiale positive maximale. Remarque: les points 1 et 2 correspondent à des ambiguïtés de mesure: ces deux nuages de gaz situés sur la même ligne de visée et à des distances différentes peuvent présenter la même vitesse radiale.



3. Schéma du disque galactique en rotation avec une ligne de visée depuis le Soleil, touchant 5 nuages H1.

## Résultats expérimentaux et leur exploitation

L'expression de  $V$ , démontrée dans l'encadré 1, indique que, pour sa détermination, il est nécessaire de relever les spectres pour différentes longitudes galactiques. De ces résultats, on pourra déduire la vitesse de rotation de notre Galaxie, ce qui sera une mise en évidence de sa structure.

### ● Relevés des spectres pour différentes longitudes galactiques

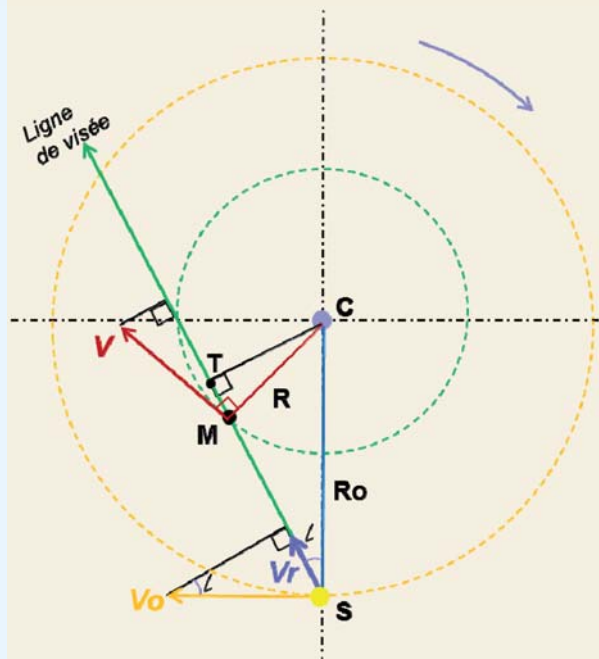
Le principe des mesures est illustré par la figure 4. Pour différentes longitudes galactiques, les spectres élémentaires sont relevés et traités comme présenté dans la première partie de l'article.

Pour chaque longitude, un spectre élémentaire est généré. Le pas de mesure tient compte des caractéristiques de l'antenne. Ainsi, un relevé est effectué tous les 2 degrés de longitude galactique, cette valeur correspondant à un demi-angle d'ouverture de l'antenne.

Toutefois, depuis l'Île-de-France, comme c'est le cas pour tout point du globe terrestre, l'observation du ciel est limitée par l'horizon radioélectrique. Depuis Orsay, emplacement de la station, les mesures sont limitées aux longitudes galactiques comprises entre 4° et 240°. Il n'est donc pas possible d'observer la totalité de notre Galaxie depuis une seule station.

## 1. Expression de la vitesse de rotation de la Galaxie

Soit à déterminer la vitesse  $V$  du gaz H1 en un point M du disque galactique, de longitude galactique  $l$  et situé à la distance  $R$  du centre de la Galaxie.



Quelques caractéristiques :

$R_0$  = distance du Soleil au centre galactique = 8,5 kpc ;

$V_0$  = vitesse du Soleil = 220 km/s ;

Repères utilisés :  $l$  = longitude galactique ; S = Soleil ;

C = centre galactique ; M = position du nuage H1 ;

$R$  = distance du nuage à C ;

T = point tangentiel au cercle de rayon CT.

$V_r$  est la vitesse radiale (sur l'axe de visée) relevée par la station de radioastronomie :  $V_r = \text{proj. } V_{H1} - \text{proj. } V_0$ .

Des considérations géométriques permettent de montrer que :

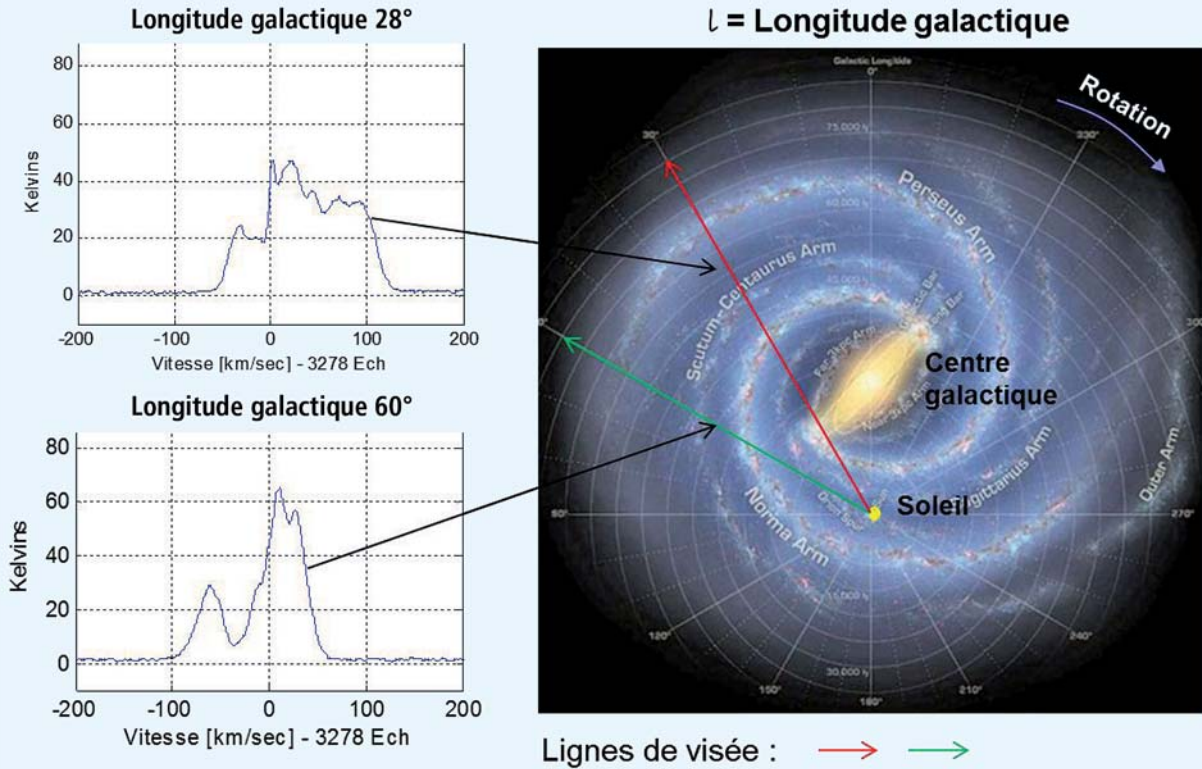
$$V_r = V(R_0/R) \sin l - V_0 (\sin l).$$

Si le point M est tel que CM est perpendiculaire à la ligne de visée (comme le point T par exemple) on a alors :  $\text{proj. } V_{H1} = V_{H1}$  et cette vitesse correspond à la vitesse radiale maximale  $V_{r_{\max}}$  observée. Dans ce cas, la distance  $R$  au centre galactique s'écrit  $R = R_0 \cdot \sin l$  et la vitesse radiale devient :

$$V_{r_{\max}} = V_{H1} - V_0 \cdot \sin l, \text{ d'où } V = V_{r_{\max}} + V_0 \cdot \sin l.$$

La mesure de  $V_{r_{\max}}$ , effectuée à différentes longitudes galactiques, dans l'espace qui est visible depuis le point d'observation, permet donc de connaître la vitesse de rotation de la Galaxie.





#### 4. Les différentes visées effectuées à des longitudes galactiques différentes.

L'enchaînement des mesures conduit à un relevé de 119 spectres pour les longitudes galactiques de 4° à 240°. La figure 5 présente quelques-uns des spectres obtenus et montre la diversité des spectres selon la longitude de la ligne de visée. Sur chaque spectre, les points les plus éloignés du zéro correspondent à  $V_{r,max}$  et permettent donc la détermination de  $V$ . Afin de mieux appréhender la structure de notre Galaxie, plutôt que de juxtaposer des spectres élémentaires, on effectue un empilage de tranches, chacune correspondant à un spectre. On a donc trois informations sur le même schéma: l'échelle de couleur donne le niveau du signal reçu en K, en Y on trace la vitesse radiale relevée (en km/s) et en X la longitude galactique (en °). On visualise ainsi 119 « tranches » comme indiqué sur la figure 6. On constate rapidement que des masses se distinguent et commencent de révéler la structure de notre Galaxie.

#### ● Vitesse de rotation de notre Galaxie

Comme vu dans l'encadré 1:

$$V = V_{r,max} + V_0 \sin l \text{ avec } R = R_0 \sin l \text{ et } R_0 = 8,5 \text{ kpc.}$$

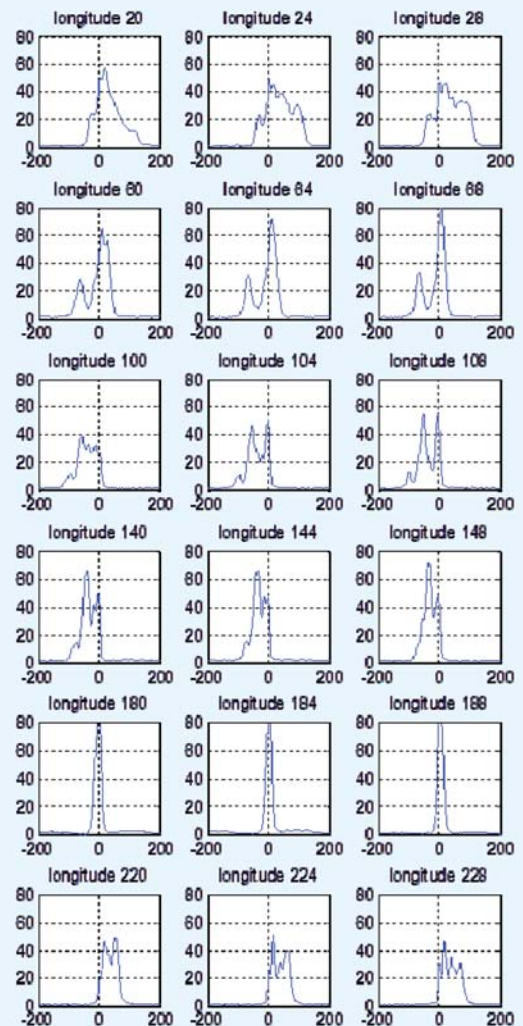
À partir des valeurs  $V_{r,max}$  relevées sur les spectres obtenus à différentes longitudes et du calcul de  $R$  correspondant, nous pouvons tracer la courbe de la figure 7. Cette courbe montre que  $V$ , à une distance  $R$  ne dépend pas de cette distance  $R$  entre le nuage H1 observé et le centre galactique.

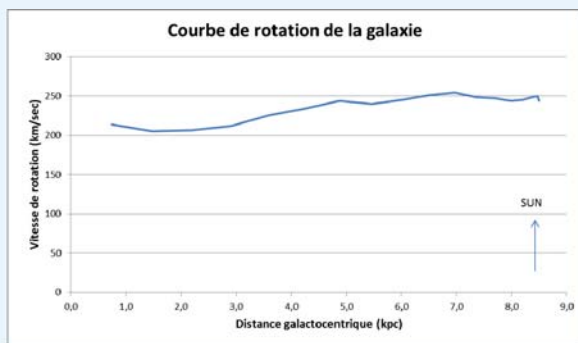
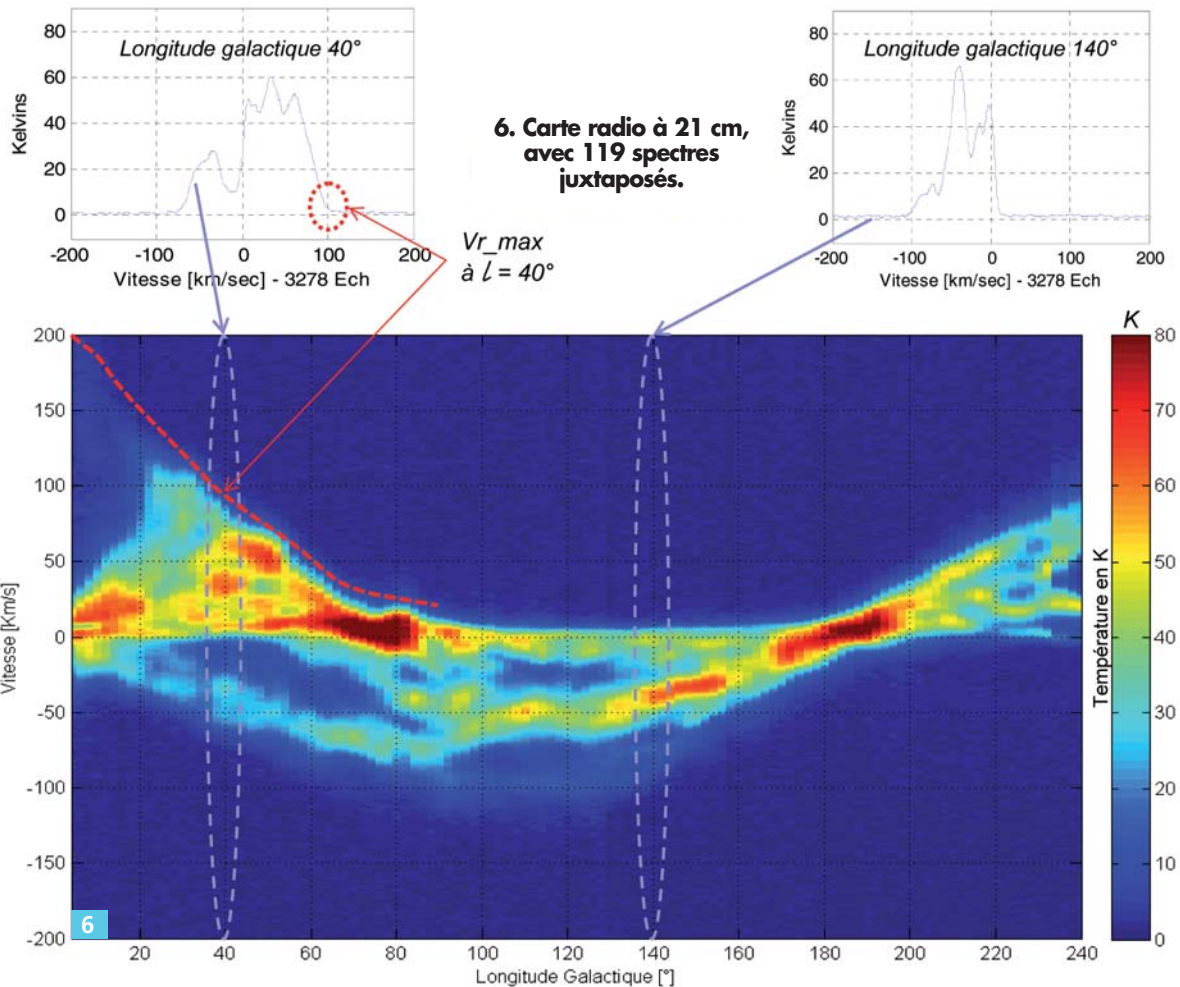
La courbe de rotation obtenue est très proche de celle que l'on trouve dans la littérature. La plupart des galaxies présentent des courbes de rotation relativement plates, où  $V(R)$  ne dépend pas de  $R$  au-delà d'un certain rayon, contrairement à la courbe de rotation des systèmes képlériens comme le Système solaire. On peut alors écrire que  $V(R) = \text{constante}$ . Dans le cas des systèmes képlériens, la vitesse angulaire  $\Omega$  décroît avec la distance au centre et la matière près du centre est en rotation avec une vitesse angulaire plus grande que la matière plus éloignée.

La figure 8 montre la différence entre la courbe de rotation subhorizontale de notre Galaxie (la Voie lactée) et la courbe de rotation décroissante attendue suivant la loi de Kepler.

Pour de grands rayons, les vitesses sont manifestement plus grandes que dans des cas képlériens et cela est, d'après les scientifiques, une preuve de l'existence de matière supplémentaire pour les grands rayons. Il s'agirait d'une voie indirecte pour montrer l'existence de la matière sombre dans la Galaxie.

#### 5. Quelques spectres obtenus à des longitudes différentes.





## Structure de la Galaxie

À partir de la carte radio de la *figure 6* et de la localisation des nuages de gaz hydrogène (présentée dans l'encadré 2), il est désormais possible de révéler la structure de notre Galaxie et d'en tracer une carte en X/Y. On observe que les nuages se déplacent suivant une vitesse principale due au mouvement de rotation autour du centre de la Galaxie. L'élargissement spectral de la raie d'hydrogène constaté est principalement dû aux mouvements internes (et aléatoires) des nuages et à la présence de plusieurs nuages sur la même ligne de visée. Ainsi, pour localiser les masses ou nuages d'hydrogène, en attendant d'obtenir une meilleure résolution de ces mesures, il est choisi de calculer la position de chaque point du spectre relevé (suivant les formules présentées dans l'encadré 2). La *figure 9* montre un exemple pour la longitude 132°.

Cet exemple est répété par la suite pour chaque longitude galactique comprise dans notre domaine d'observation, à savoir, de 4° à 240°. Toutefois les remarques suivantes sont à prendre en compte avant d'analyser le résultat :

- La carte en X/Y obtenue (*figure 10*) représente les niveaux des signaux reçus et non les quantités d'hydrogène. Un calcul complémentaire doit être effectué pour tenir compte de la distance.
- Les risques d'ambiguïté pour les longitudes  $< 90^\circ$  ne sont pas traités. Si 2 solutions positives existent, alors les 2 solutions sont présentées. Des mesures complémentaires seront effectuées pour lever ces ambiguïtés.

La *figure 10* présente la carte de notre Galaxie dans sa partie observable depuis le site d'Orsay.

## 2. Localisation des masses d'hydrogène

Rappelons les principaux résultats précédemment énoncés :

$$Vr = V(Ro/R) \sin l - Vo \sin l$$

Puis il a été montré que  $V(R) = \text{constante} \Rightarrow V = Vo$ , ce qui implique :

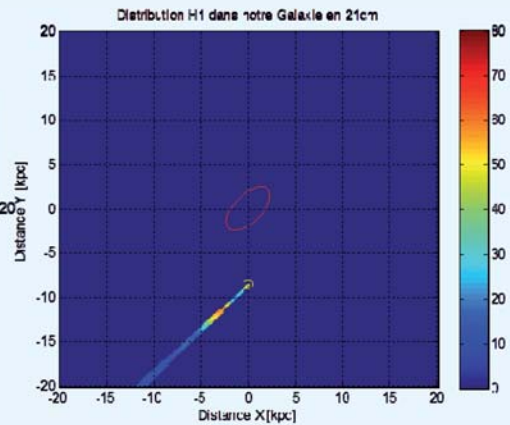
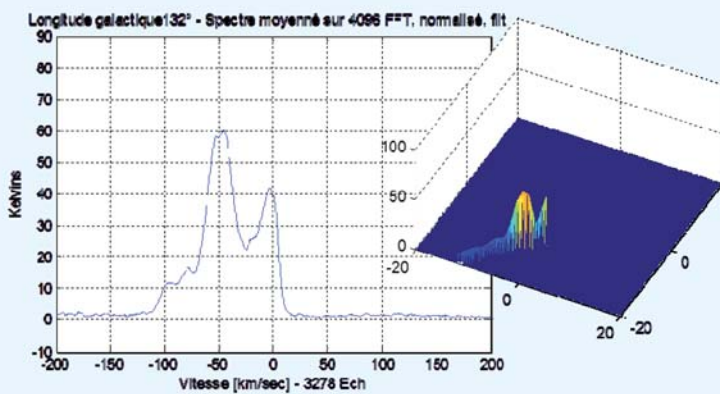
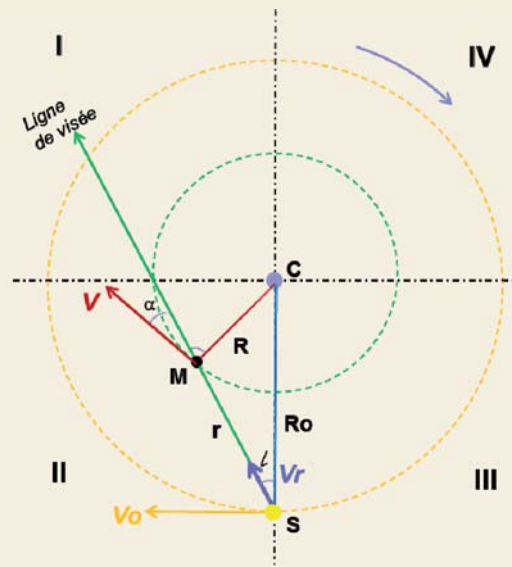
$$Vr = Vo \sin l [(Ro/R) - 1] \text{ d'où } R = Ro Vo \sin l / (Vo \sin l + Vr).$$

Désormais, tous les éléments étant connus, nous pouvons calculer  $R$ , distance de la masse d'hydrogène au centre galactique.

Pour déterminer  $r$ , distance de la station à la masse d'hydrogène, il est nécessaire de se reporter à la figure à droite et au théorème d'Al-Kashi (théorème de Pythagore généralisé). D'après ce théorème, dans le triangle CSM, nous avons la relation suivante :  $R^2 = Ro^2 + r^2 - 2 Ro r \cos l$ , il s'agit donc d'une équation du second degré qui a 2 solutions possibles :  $r = Ro \cos l \pm (R^2 - Ro^2 \sin^2 l)^{0.5}$ .

Toutefois, les précautions suivantes doivent être prises en compte :

- Si  $\cos l < 0$  (quadrants II ou III), on peut montrer qu'il n'y a qu'une et une seule solution positive  $r$  car  $R$  est toujours plus grand que  $Ro$ .
- Dans les autres quadrants, pour certaines vitesses  $Vr$ , il peut y avoir 2 solutions positives. Si on obtient deux solutions positives, il y a donc une ambiguïté difficile à lever. Les valeurs négatives de  $r$  sont éliminées car elles n'ont pas de réalité physique.

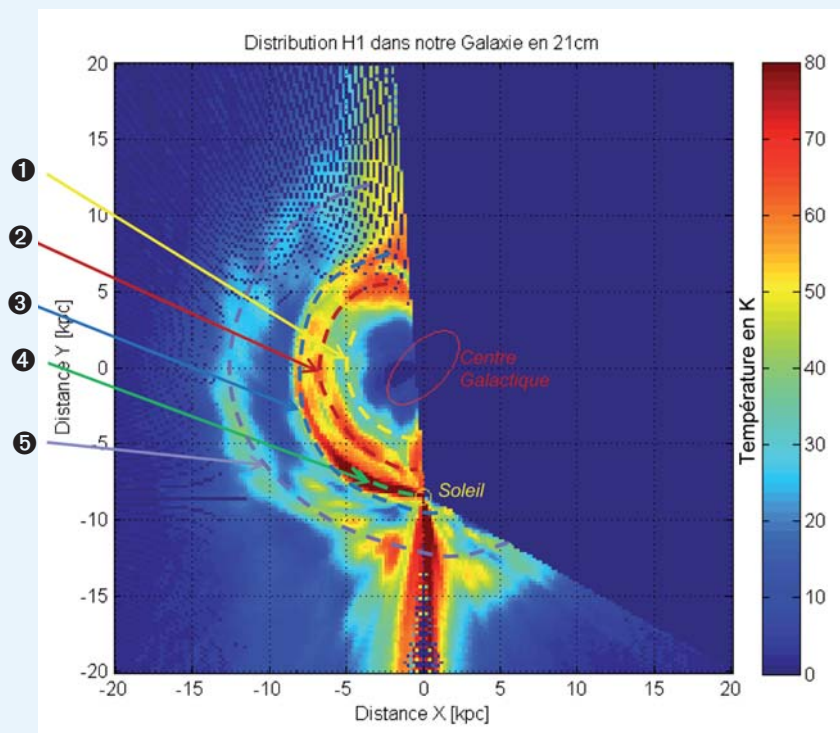


### 9. Du spectre à la localisation du nuage émetteur.

#### 10. Carte obtenue et son interprétation.

Nous appuyant sur les données connues (13), il est possible de distinguer 4 à 5 bras de notre Galaxie :

- Le premier (jaune) difficile à mettre en évidence, appelé Scutum-Crux.
- Un second (rouge) à l'intérieur de l'orbite solaire (bras du Sagittaire).
- Un troisième (bleu) correspond au bras de Persée.
- Un quatrième (vert), notre bras local (bras d'Orion), dans lequel se trouve le Soleil difficile à séparer du bras de Persée.
- Un cinquième (gris) assez éloigné du centre galactique (env. 12,5 kpc) et à l'extérieur de notre orbite (bras du Cygne ou extérieur)..



## Et pour conclure

### ● Appréciation des résultats

Ce premier résultat est très encourageant. En commençant ces travaux, il était difficile de s'imaginer arriver à un tel niveau de détails et de reproductibilité dans les mesures. Cela a permis une cartographie précise de notre Galaxie. Toutefois, certains détails n'ont pas été résolus et pour améliorer ces résultats il est nécessaire de prolonger les traitements, à savoir :

- convertir autant que possible le niveau de signal reçu en volume ou masse d'hydrogène ;
- traiter les ambiguïtés en distance afin de supprimer certains artefacts qui sont peut-être le fait de la mauvaise résolution du bras d'Orion ;
- compléter les mesures à partir d'autres observatoires afin de restituer une vue intégrale de notre Galaxie.

L'intérêt de ce type d'observation est qu'il est le seul permettant de restituer la forme de notre Galaxie. Celle-ci n'est pas observable directement en optique et aucun engin spatial ne peut effectuer ce survol ! Le gros inconvénient est le temps exigé pour y parvenir : il faut effectuer des heures et des heures de mesures et de traitement pour obtenir un résultat. L'image obtenue (figure 10) n'est pas instantanée et ne le sera jamais car, à un instant donné, la vision de notre Galaxie n'est que partielle (environ 1/3). Il faut attendre la rotation terrestre pour visualiser le second tiers et utiliser des données d'un autre observatoire pour obtenir le dernier tiers.

### ● Prochains travaux en 21 cm

La station étant réalisée, elle est désormais dédiée à l'exploration de cette raie H1. L'observation décrite dans cet article ne concerne que l'étude du plan galactique (latitude 0°). Les prochaines campagnes de mesure seront dédiées à l'étude de l'épaisseur du disque galactique et consisteront en des relevés similaires mais pour différentes latitudes galactiques.

Ces mesures permettront de cartographier la galaxie en 3D et devraient permettre de mettre en évidence le gauchissement (WARP) de notre disque galactique comme le montrent le graphe et la vue d'artiste de la figure 11.



11. Vue d'artiste de la Galaxie gauchie.

### ● Intérêt de ce type d'observation – apport des amateurs en radioastronomie

Cet article montre que les amateurs marchent modestement sur les pas des scientifiques professionnels. Mais les progrès technologiques, les moyens mis en œuvre, le nombre d'opérateurs, les connaissances acquises et les buts font que les résultats ne sont pas comparables.

Les objectifs d'une station amateur sont d'un autre ordre. Tout d'abord il s'agit d'un hobby et, je le rappelle souvent, amateur signifie « qui aime » et n'est pas à opposer à professionnel. À partir de là, le temps ne compte pas et c'est ce qui change tout. L'amateur est plus accessible, il peut initier des jeunes et les former aux bases de l'astronomie, de la radio et de la radioastronomie ; il transmettra ainsi le plaisir de pratiquer une science qui conduira une partie d'entre eux vers une carrière scientifique. Depuis la création de la station de radioastronomie, chaque année des petits groupes de jeunes sont accueillis par les associations AAV et F6KSX/ARRL dans le cadre de travaux demandés par les lycées, type TPE ou TIPE. Le fait d'être accessible et de pouvoir consacrer suffisamment de temps permet à ces jeunes de se faire une première idée du milieu scientifique même si nos moyens sont limités.

De plus, une certaine attirance existe du fait de pouvoir compléter certains travaux théoriques par des mesures physiques et mettre en évidence certains phénomènes. Certains jeunes étudiants (fig. 12) vont alors plus loin en participant à des concours scientifiques comme « C. Génial » ou « Olympiades de la Physique ». Sur le nombre, quelques-uns deviendront radioastronomes.

J.-J. Maintoux – F1EHN ■

**12. Devant l'antenne de la station de radioastronomie de l'AAV/ARRL dédiée au 21 cm,** l'auteur de l'article accompagné de deux étudiantes (Judith et Madeleine Gilly) et de leurs tuteurs (R. Cavaroz et J.-M. Vienney), le 25 février 2012.

Remerciements à l'AAV, ses membres et à la ville d'Orsay pour leur accueil et leur participation.

1. « The spiral structure of the outer part of the Galactic System derived from the hydrogen emission at 21 cm wavelength », <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1954BAN....12..117V/0000117.000.html>
2. Page « Radiostro » de J.-J. MAINTOUX : <http://www.f1ehn.org>
3. Futura-Sciences : « La raie à 21 cm : une clé pour l'astrophysique, la cosmologie et Seti » par Laurent Sacco [http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/physique-1/d/la-raie-a-21-cm-une-cle-pour-lastrophysique-la-cosmologie-et-seti\\_27588/](http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/physique-1/d/la-raie-a-21-cm-une-cle-pour-lastrophysique-la-cosmologie-et-seti_27588/)
4. Wikipédia : « Raie21cm » [http://fr.wikipedia.org/wiki/Raie\\_%20A0\\_21\\_cetim\\_%20A8treset\\_%20Voie\\_Lactee](http://fr.wikipedia.org/wiki/Raie_%20A0_21_cetim_%20A8treset_%20Voie_Lactee)
5. Hands on Universe & OnsalaSpace Observatory : Radioastronomie « à portée de main » : cartographie de la Voie lactée <http://www.fr.euhou.net/index.php>
6. Observatoire de Medicina – Italie : Extraits de « Technicaldevelopments » at IRA- INAF [http://www.med.ira.inaf.it/index\\_EN.htm](http://www.med.ira.inaf.it/index_EN.htm)
7. Techno-Sciences : Corps noir <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3265>
8. La radiométrie <http://radiometrie.free.fr/l-A.htm>
9. Radioastronomy (2nd edition) par John D. Kraus.
10. « Radio Astronomy with the 21 cm Hydrogen Line at the International Space University » : (Joachim Köppen) <http://www.astrofizik.uni-kiel.de/~koeppen/Haystack/index.html> Remerciements à Joachim Köppen
11. Unité astronomique-Parsec : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Parsec>
12. Observatoire de Paris-Meudon/Cours d'astronomie - <http://aramis.obspm.fr/~combes/fcombes/cours-astro/index.html>
13. Carte de la galaxie selon « Atlas of Universe » [www.atlasoftheuniverse.com/milkyway.html](http://www.atlasoftheuniverse.com/milkyway.html)

