

# ASTROPHYSIQUE

## Panorama de la radioastronomie moderne

Julien Girard, AIM/CEA-Saclay, Université Paris Diderot

*L'auteur nous décrit la passionnante histoire de la détection des signaux radio naturels de nature astrophysique et de l'exploitation qui en découle.*

### Vous avez dit « radio » ?

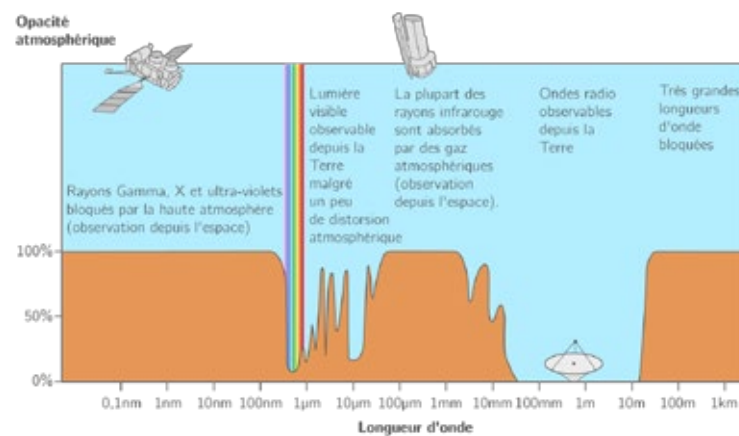
Quand on parle de « radio », c'est généralement grâce au contexte qu'on arrive à comprendre de quoi on parle : on va « passer » une radio (rayons X, imagerie médicale), on « écoute » la radio (bande AM-FM), on « communique » par radio (RADAR, radiotélécommunication, mobiles...).

La radioastronomie est le champ de l'astronomie dédiée à l'usage d'ondes lumineuses émises dans le

domaine radio (voir l'encadré ci-dessous). Ce champ recouvre une partie instrumentale non négligeable mais également l'étude de la physique des objets responsables des émissions radio. La radioastronomie a bénéficié des décennies de développements civils et militaires depuis les années 30 et 50 jusqu'à avoir, depuis quelques dernières décennies, ses propres « filières » de développement instrumental au sol et dans l'espace. Commençons d'abord par un peu d'histoire.

### La plus grande fenêtre du spectre électromagnétique

Le domaine radio couvre la plus grosse portion observable du spectre électromagnétique avec des longueurs d'onde pouvant aller du submillimétrique ( $\lambda \approx 0,1 \text{ mm} - f \approx 100 \text{ GHz}$ ) au kilométrique ( $\lambda > 100 \text{ km} - f < 1 \text{ kHz}$ ). Elle concerne une gamme d'énergie faible en comparaison des autres gammes de rayonnement électromagnétique (IR, visible, UV, X et gamma).



Cependant, tout n'est pas observable depuis le sol. Sur Terre, il existe une fenêtre de « transparence » radio allant de 10 MHz jusqu'à environ 30-100 GHz. La fréquence limite basse est une fréquence de coupure due à la présence de l'ionosphère terrestre jouant le rôle d'absorbant. Aux plus hautes fréquences, c'est l'atmosphère et la vapeur d'eau qui va faire barrière au rayonnement. Pour observer en dehors de cette fenêtre, il est nécessaire d'aller observer dans l'espace.

### La radio à ses débuts

Tout commença, en quelque sorte, quand l'ingénieur Karl Jansky, travaillant pour les laboratoires Bell, découvrit le premier signal radio d'origine astrophysique à 20 MHz. Avec un « manège » d'antenne filaire, il était chargé d'étudier les sources parasites d'origine humaine (appelé Interférence Radio Fréquences – *RFI* en anglais) pour améliorer la radio-télécommunication transcontinentale dans le domaine « décadrétique » (à  $f \approx 20 \text{ MHz}$  soit des longueurs d'onde de 10 à 30 m). Après avoir identifié

les sources principales des RFI dans son environnement, il remarqua qu'un signal résiduel et périodique était toujours présent (avec une période de 23 h 56 min au lieu de 24 h, soit la période sidérale). Après plusieurs tentatives pour identifier et éliminer le signal, il conclut à la découverte du premier signal radio « naturel » de nature astrophysique dans son papier original de 1933. Il s'agissait en fait du signal radio de la Voie lactée (voir figure 2 haut), qui domine à cette fréquence. Avec un collègue, A.M. Skellett, ils observèrent également des émissions radio associées à des

météores interagissant avec l'ionosphère (voir l'article de J.L. Rault, page 22). Dans la même période, Ruby Pane-Scott envisageait d'utiliser la radio pour l'astronomie. Certes moins connue, elle est toutefois la première radioastronome à qui l'on doit les premières contributions à la physique solaire en radio (notamment la découverte des sursauts de type I et III).

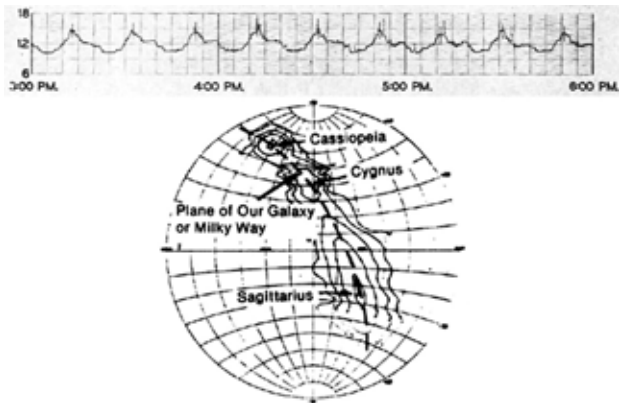


Fig.2. En haut, la Voie lactée par K. Jansky à 20 MHz. En bas, carte de la Voie lactée par G. Reber à 160 MHz.

Grote Reber, autre précurseur fondamental du domaine, reprit les travaux de Karl Jansky avec un radiotélescope méridien composé d'un collecteur parabolique fixe de 9,5 m installé dans son jardin et connecté à un récepteur radio. Il confirma ainsi la découverte de Karl Jansky en cartographiant le rayonnement radio de la Galaxie à 160 MHz à une très faible résolution angulaire (figure 2 bas). Son antenne avait une géométrie que bon nombre d'antennes professionnelles adopteront par la suite.

Il va sans dire que les techniques radio ont d'abord été développées à des fins militaires et que c'est seulement en temps de « paix », après la seconde guerre mondiale, que l'application de cette technologie à des fins scientifiques a pu connaître son essor. Dès lors, de nouvelles sources radio ont pu être détectées dans plusieurs gammes d'énergie, de durée et de taille sur le ciel.

Une autre découverte majeure fut la détection en radio, de la raie d'émission de l'hydrogène neutre (HI) qui fut postulée en 1944, par Hendrick van de Hulst à une fréquence de 1 420 MHz. Ce dernier souligna l'intérêt de rechercher cette émission vu la quantité d'hydrogène neutre présent dans le milieu interstellaire. Ce fut effectivement le cas en 1951, quand Ewen et Purcell de l'Université d'Harvard, purent détecter cette émission. La radioastronomie de l'hydrogène neutre devint un domaine incontournable puisqu'elle permettait non seulement de faire une cartographie de la matière dans notre

galaxie (voir l'article de Frédéric Pitout, page 19) et ses proches voisines, mais également de faire de grands relevés de galaxies plus lointaines (dont l'émission radio est assujettie aux phénomènes d'expansion et donc de décalage vers le rouge). En 1965, c'est encore dans le domaine radio qu'a été découvert le fond diffus cosmologique à environ 3 K, qui a valu par la suite le prix Nobel à Arno Penzias et Robert Wilson. Les études qui ont suivi ont permis de contribuer largement aux travaux d'observation (missions COBE, WMAP, Planck), de compréhension et de développement de modèles pour la cosmologie moderne.

C'est donc sur un période s'étalant des années 30 aux années 60 que naquit la radioastronomie, grâce à l'expérience d'ingénieurs radio hors pairs et pointilleux et à l'éclairage de théoriciens.

Aujourd'hui, l'unité commune de mesure utilisée pour la densité spectrale de flux est le *Jansky* (Jy) et vaut  $10^{-26} \text{ W.m}^{-2}.\text{Hz}^{-1}$ .

C'est un domaine d'expertise scientifique (dédié à l'étude des sources astrophysiques) et un domaine d'expertise technique (pour la conception et l'exploitation d'instruments). Pour observer ces sources, plusieurs observatoires majeurs ont été construits dans le monde en plus d'une myriade de petites antennes paraboliques individuelles consacrées à l'observation du HI.

## Une antenne, pour mesurer une température à distance

L'antenne radio est le composant indispensable à la mesure d'un signal radio (voir article introductif). Au vu des relatives basses fréquences du domaine radio, il est possible de mesurer l'intégralité de l'information portée par l'onde électromagnétique : son amplitude, sa phase et sa polarisation complète. Une antenne radio (parfois qualifiée de « transducteur électromagnétique » dans certains ouvrages obscurs) est un dispositif permettant la conversion d'une onde électromagnétique se propageant en « espace libre » en une information se propageant dans un espace guidé (guide d'onde) et vice-versa. Une antenne est caractérisée par son gain  $G(\theta, \Phi)$  (sans dimension) et son aire collectrice effective  $A_{\text{eff}}(\theta, \Phi) = G(\theta, \Phi)\lambda^2/4\pi$ .

C'est un instrument qui permet également de mesurer une température. En effet, si on considère la puissance spectrale  $P$  (en  $\text{W.Hz}^{-1}$ ) reçue par l'antenne, on peut écrire  $P = k_b T_A$  en fonction de la constante de Boltzmann et d'une température en Kelvin qu'on appelle température d'antenne. On définit la densité de flux en Jansky par

$$S = \frac{2k_b T_A}{A_{eff}}$$

avec  $T_A$ , la température d'antenne et  $A_{eff}$  l'aire effective de l'antenne.

L'envergure (par rapport à la longueur d'onde), la géométrie, la nature de l'antenne comptent parmi les facteurs prépondérants régissant les performances d'une antenne (gain maximum, forme du diagramme de rayonnement, largeur de bande, etc.). Elle peut prendre la forme d'une tige, d'un cornet, être munie d'un réflecteur parabolique pour concentrer les ondes en un point focal où se fait la mesure.

Comme pour un télescope optique, la résolution angulaire maximale « garantie » par la théorie suit la loi de la diffraction

$$\delta\theta \propto \frac{\lambda}{D}$$

où  $\delta\theta$  est la résolution angulaire de l'antenne,  $D$  est l'envergure maximale équivalente de l'antenne, facile à définir pour une parabole mais beaucoup moins quand il ne s'agit que d'un fil... (le symbole  $\propto$  indique la proportionnalité). L'augmentation du paramètre  $D$ , va améliorer non seulement sa sensibilité ( $S \propto D^{-2}$ ) et mais aussi sa résolution angulaire ( $\delta\lambda \propto D_{\perp}$ ). Ainsi plus  $D$  est grand, plus l'antenne sera sensible aux faibles rayonnements et plus elle permettra d'effectuer une mesure fine. L'augmentation du paramètre  $D$  sera un enjeu « de taille » dans le développement d'antennes toujours plus sensibles et précises. Il est possible de faire des simulations d'antennes simples, grâce à l'application 4NEC2 (voir section ressources).

## L'Univers radio

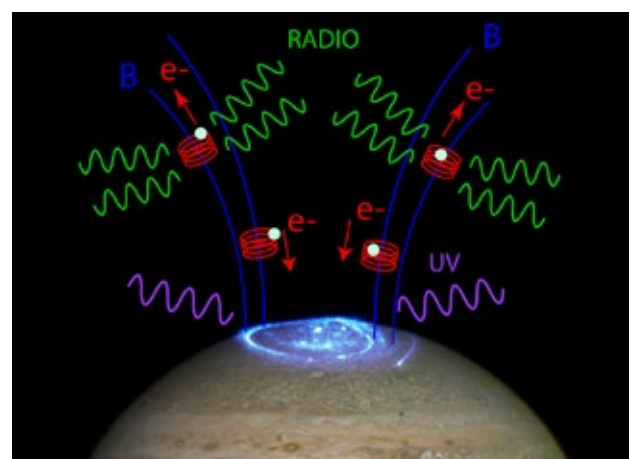
L'objet n'est pas ici de dresser une liste complète des sources radio, il va sans dire que la richesse des découvertes faites dans le domaine radio remplit très facilement plusieurs rayons d'étagères. Il existe cependant une universalité des objets et des processus de rayonnement radio. Les ingrédients pour générer de l'émission radio sont simples : il faut du plasma, un champ magnétique, des électrons.

Outre les objets visibles en radio à travers leur émission thermique (c'est à dire la partie du spectre de corps noir débordant dans le domaine radio) comme les étoiles (dont notre Soleil), d'autres objets ont été découverts et ont montré des comportements bien plus complexes dont certains sont encore à l'étude aujourd'hui.

L'observation des premiers pulsars en radio a, dans un premier temps, surpris à cause de

leur très forte luminosité radio qui, rapportée à une température, semblait dépasser le cadre physiquement admissible. Ainsi les théoriciens ont dû réfléchir à des mécanismes d'émission pouvant rendre compte de ces observations. La description théorique de ces rayonnements est cependant plus complexe et fait appel, parmi d'autres processus, aux processus cyclotron et synchrotron bien connus des accélérateurs de particules.

Les objets compacts (de l'étoile à neutrons jusqu'aux plus gros trous noirs massifs de noyaux actifs de galaxie) ont des émissions radio associées à des processus d'accélération de matière dans des jets relativistes. Pour simplifier, il est possible de faire des analogies pour comprendre l'origine des émissions radio, même si ces objets sont de nature assez différente. Dans le Système solaire, les deux objets « les plus brillants » en radio qui s'y trouvent sont Jupiter et le Soleil (quand il est actif). Jupiter possède un très fort champ magnétique dipolaire ( $B \approx 4,2$  gauss) et les électrons présents dans le voisinage de Jupiter sont contraints de voyager le long de des lignes de champ (notamment reliant Jupiter à son satellite Io). Certains électrons vont interagir aux niveaux des pôles et être « perdus » dans la haute atmosphère en donnant lieu à des phénomènes d'aurores (similaire à ceux sur Terre) observables en UV et en visible (voir l'expérience pédagogique *planeterra*<sup>1</sup>). Les autres électrons qui vont rebondir et remonter le long des lignes de champ magnétique, vont donner naissance à des émissions radio cohérentes extrêmement puissantes ( $> 10^6$  Jy) dont la fréquence ne dépassera pas 40 MHz et qui seront focalisées suivant un cône d'émission (voir Zarka, 1998).



**Fig.3.** Schéma simplifié de l'accélération des électrons au voisinage des pôles de Jupiter: Le mécanisme d'émission en jeu est ici l'instabilité MASER-Cyclotron (Zarka, 1998).

1 <http://planeterra.obs.ujf-grenoble.fr/>

Le projet RadioJOVE<sup>2</sup> permet de monter soi-même une antenne radio élémentaire capable de capter ces émissions radio à peu de frais.

### **Toujours plus grand, toujours plus sensibles, toujours plus précis... mais toujours plus lourds...**

Un télescope unique a une résolution angulaire limitée par la diffraction. Si l'on veut repousser ces limites, il faut soit diminuer la longueur d'onde (augmenter la fréquence) soit augmenter l'envergure totale de l'antenne D.

Ainsi, de grandes paraboles directionnelles ont pu être construites, comme celle d'Effelsberg ou celle de Green Bank et possèdent une taille maximale de 100 m de diamètre. Malheureusement pour ce dernier, les contraintes mécaniques furent telles qu'en 1988, il s'écrasa sous son propre poids. La presse locale accusait déjà les extra-terrestres là où simplement, les limites physiques avaient été atteintes pour ce type de télescope.

Pour atteindre des sensibilités et des résolutions angulaires supérieures, il a fallu trouver des solutions alternatives. Le radiotélescope d'Arecibo, avec ses 300 m de diamètre, en est un exemple. Ici, la parabole réfléchissante est immobile, puisque construite dans le cœur d'un ancien volcan (heureusement éteint) tandis que le foyer récepteur, lui, est mobile et permet le pointage de différentes directions du ciel. Arecibo comptait parmi les radiotélescopes les plus sensibles existant dans cette gamme. La Chine a inauguré tout récemment, un radiotélescope de ce type, le radiotélescope FAST, de 500 m de diamètre. Aujourd'hui, FAST est LE plus puissant radiotélescope de ce type.



Fig.4. Les radiotélescopes d'Arecibo et FAST.

### **Combiner l'information pour mieux observer**

Il est fastidieux et onéreux d'investir dans des observatoires géants et monoblocs comme Arecibo ou FAST. Il faut disposer d'une cavité naturelle suffisamment grande pour recevoir la structure d'un télescope de cette envergure.

<sup>2</sup> <http://www.radiojove.org>

Un télescope de taille « standard », cependant, est facile à déployer mais ne permet de faire que des mesures intégrées « à 1 point ». Autrement dit, en pointant une direction particulière, on collecte la lumière provenant de cette direction à travers le diagramme de rayonnement de l'antenne. Et en pointant plusieurs directions successives, il est possible de reconstruire la distribution de l'émission, pour en faire une cartographie.

Il existe cependant des moyens de construire des télescopes « synthétiques » aussi (voire plus) sensibles qu'Arecibo ou FAST mais permettant d'atteindre des résolutions angulaires très supérieures à partir de télescopes individuels en combinant leur signaux grâce à la technique de la « synthèse d'ouverture ».

Il existe deux façons de combiner ensemble les signaux.

### **Réseaux phasés**

On peut faire la somme des signaux électriques pour former un « réseau phasé ». Un tel réseau est considéré par la suite comme un télescope unique « synthétique », dont les caractéristiques ne dépendent que de l'agencement relatifs des antennes sur le sol, et de la pondération des signaux de chaque terme de la somme. Quand la somme est parfaitement « en phase », on parle de somme cohérente. En jouant sur la pondération de manière adéquate, il est possible de « tailler » le diagramme de rayonnement (on parle de *beamforming*). On peut lui donner une forme arbitraire mais surtout pointer « électroniquement » l'antenne synthétique dans la direction d'observation désirée. Des exemples d'instruments de ce type, visibles en France, sont le réseau décimétrique de Nançay, la station LOFAR de Nançay ou encore le projet NenuFAR (voir plus loin).

### **Interféromètres**

On peut calculer les produits deux à deux des signaux de chaque paire d'antennes (formant une *ligne de base*) pour former un « interféromètre ». Au Nouveau-Mexique, le réseau VLA (« Very Large Array », illustré dans le film *Contact*) en est un exemple. Dans un schéma simplifié, on a affaire également à un instrument synthétique, mais il ne permet pas de mesurer directement le ciel radio, mais la transformée de Fourier du ciel radio. Pour une direction donnée et à un instant et une fréquence donnée, chaque ligne de base interférométrique va être sensible à une *fréquence spatiale* du ciel (voir encadré). Plus on possède d'antennes à des positions différentes sur le sol, plus on dispose de

fréquences spatiales variées et plus riche sera la connaissance de la transformée de Fourier du ciel. Un interféromètre permet en tout premier lieu de faire de l'astrométrie mais aujourd'hui, l'immense majorité des interféromètres permettent de produire des images. Des exemples d'interféromètres sont le VLA, ALMA, GMRT et SKA.

### Interférométrie et transformée de Fourier

La transformée de Fourier (TF) est un opérateur mathématique permettant de représenter tout signal, par exemple un signal « temporel » quelconque dans le domaine fréquentiel. Une image, en tant que signal spatial à 2D, peut également être transformé vers le domaine des « fréquences spatiales » et produire un spectre à 2D. Dans un interféromètre, la « donnée » est le coefficient complexe issu du produit de corrélation entre les signaux électriques de deux antennes, appelé *visibilité*. Pour un interféromètre à N antennes, on recense N(N-1)/2 paires indépendantes et autant de fréquences spatiales associées. Chaque ligne de base va fournir à chaque temps et fréquence, un échantillon de la fonction de visibilité complexe V. Dans un cadre simplifié où les antennes sont parfaites et identiques, la mesure de visibilité entre l'antenne p et q peut s'écrire :

$$V_{pq} = \iint_{\Omega} I(\vec{s}) e^{-\frac{2\pi i}{\lambda} \vec{b}_{pq} \cdot \vec{s}} d\Omega$$

où V est la fonction de visibilité, I la distribution de brillance du ciel dans la direction du vecteur  $\vec{s}$ ,  $\vec{b}_{pq}$  la ligne de base,  $\Omega$  le champ de vue des antennes et  $\lambda$  la longueur d'onde. Cette relation se ramène à une forme de transformée de Fourier à deux dimensions<sup>3</sup>.

Il est possible de comprendre plus finement la relation entre TF et interférométrie grâce à l'outil interactif et ludique d'un interféromètre avec « Aperture Synthesis Simulator » crée par I. Marti-Vidal<sup>4</sup> (voir section ressources).

### L'exigence a un prix

Il est donc possible construire de très grands télescopes par synthèse d'ouverture à partir de « petits » télescopes. Cependant, les grands observatoires radio sont aussi exigeants en termes de propreté de l'environnement que leurs équivalents en visible. Des télescopes comme le VLT sont construits dans des milieux plutôt arides, en altitude et loin de sources de pollution lumineuse pouvant limiter la

3 Pour plus de détails, se reporter à <https://www.cv.nrao.edu/~sransom/web/Ch3.html>

4 <https://launchpad.net/apsynsim>

sensibilité des observations. Il en va de même pour la radio et la pollution générée par l'activité humaine (interférences radio fréquences générées par des moteurs, les technologies de télécommunication, les convertisseurs et systèmes électriques en général, etc.). L'instrument SKA en est un exemple en Afrique du Sud et en Australie.

### Imagerie et étalonnage

Une antenne ou un réseau d'antennes, comme tout instrument, doivent être étalonnés afin de séparer les déformations du signal depuis l'émission jusqu'au récepteur. Plusieurs problèmes peuvent survenir : des effets instrumentaux (par exemple, des variations de la réponse de l'instrument en fonction de la température, de l'humidité, des contraintes physiques et de l'électronique) ou des effets de propagation comme la turbulence ionosphérique (jouant au passage le même rôle néfaste qu'une atmosphère turbulente pour un télescope visible). L'étalonnage moderne inclut des effets beaucoup plus fins et requièrent un formalisme et des méthodes avancées pour parvenir au meilleur étalonnage possible (voir notamment l'équation de la Mesure [Smirnov, 2011]).

### La radio, où en est-on aujourd'hui ?

La radioastronomie a connu une deuxième vie depuis l'émergence du calcul haute performance et de la télécommunication optique, rendant possible la construction de réseaux d'antennes géants. Aujourd'hui, la norme pour les grands observatoires disponibles est de construire des réseaux phasés et des interféromètres.

La partie « haute » du spectre est dédiée à la radioastronomie millimétrique. Elle permet d'étudier à distance des raies moléculaires dans le milieu interstellaire, à travers la spectroscopie en émission et en absorption. Les instruments qui sont dédiés à cette gamme de longueurs d'onde sont par exemple, l'IRAM, ALMA et le projet NOEMA.

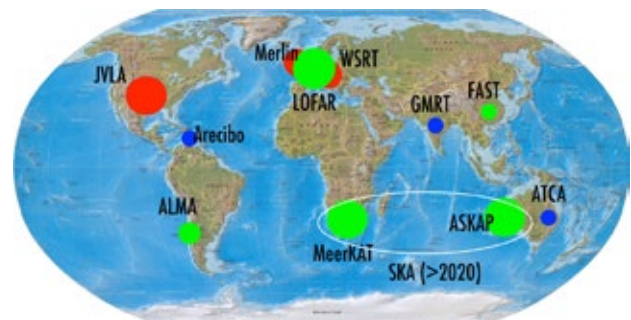
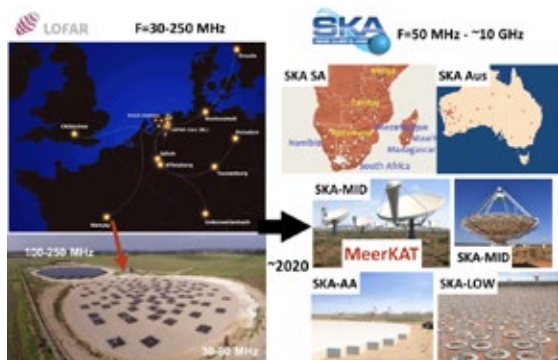


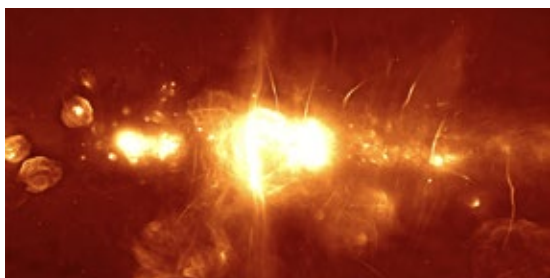
Fig.5. Les grands radiotélescopes dans le monde (bleu : instruments historiques, rouge : instruments ayant bénéficiés d'une amélioration récente, vert : nouveaux instruments).

LOFAR, le *LOW Frequency ARray*, est un interféromètre de réseaux phasés fonctionnant dans la gamme 30-250 MHz qui a la particularité de n'avoir aucun élément mobile. L'élément de base est une antenne élémentaire fixe, regroupée dans des réseaux phasés de 96 antennes. Chaque réseau phasé constitue une antenne « virtuelle » dont le signal est numérisé et envoyé proche du cœur de l'instrument aux Pays-Bas où les produits de corrélations sont calculés. Les « stations » LOFAR sont réparties dans plusieurs pays européens (dont la France voir figure 6 gauche).



**Fig.6.** À gauche, l'instrument LOFAR, précurseur de SKA. À droite, les différentes composantes de l'instrument SKA et MeerKAT son précurseur en Afrique du Sud.

L'amélioration des capacités aux basses fréquences de LOFAR fait l'objet d'un projet dédié à la station de radioastronomie de Nançay, le projet NenuFAR, constituant également un interféromètre et un réseau phasé dont les performances rivalisent avec celles d'Arecibo.



**Fig.7.** Centre de la Galaxie, champ de  $2^\circ \times 1^\circ$  avec MeerKAT.

Grâce aux techniques d'étalonnage et d'imagerie, il est possible d'améliorer énormément les performances théoriques instrumentales. L'actualité récente permet d'illustrer ce fait en mettant en avant l'un de ces nouveaux instruments, MeerKAT (le préfixe « Meer » signifie « plus » et KAT, Karoo Array Telescope) précurseur de l'instrument SKA, le *Square Kilometre Array*, possédant une aire effective de 1 km<sup>2</sup> avec ses centaines d'antennes. Avec seulement 64 antennes, MeerKAT nous offre la vue la plus nette du centre de la Galaxie en radio (voir figure 7), représentant un premier jalon de la révolution amorcée par la radio astronomie moderne.

En comparant avec l'observation de Karl Jansky et la carte de G. Reber (à beaucoup plus basses fréquences et avec moins de moyens), du chemin a effectivement été parcouru pour la progression des connaissances de l'Univers Radio.

## Les ressources disponibles

La construction de petits projets radio demandant un certain investissement humain pour un petit investissement matériel, plusieurs projets de vulgarisation et d'animation scientifique existent pour en montrer les concepts. En voici une sélection non-exhaustive :

- Sonder les bras de la Voie lactée avec l'hydrogène neutre :
- antennes EU-HOU (réservation pilotage et observation à distance possibles)<sup>5</sup> ;
- suivre les activités du radio astronome amateur Jean-Jacques Maintoux (F1EHN)<sup>6</sup> ;
- article de Frédéric Pitout (page 19).
- Simuler une antenne<sup>7</sup>.
- Simuler un interféromètre<sup>8</sup>.
- Aller visiter ou faire visiter le pôle des étoiles et les installations radio à la station de radio-astronomie de Nançay<sup>9</sup>.
- Surveiller maintenant l'état du Soleil et de Jupiter avec le réseau décimétrique (DAM)<sup>10</sup>.
- Commander sa propre antenne radio pour suivre l'activité de Jupiter à 20 MHz<sup>11</sup>.
- Écouter les « chants du cosmos » - Philippe Zarka (transcriptions audios et visuelles de l'activité de radiosources)<sup>12</sup>. ■

Pour aller plus loin

- LOFAR ([www.lofar.org](http://www.lofar.org))
- SKA (<https://www.skatelescope.org/>)
- IRAM (<http://www.iram-institute.org/>)
- Images radio Galerie NRAO (<http://images.nrao.edu/>)
- Communiqué de presse du 13-08-2018 (MeerKAT/SKA) <https://www.ska.ac.za/media-releases/meerkat-radio-telescope-inaugurated-in-south-africa-reveals-clearer-view-yet-of-center-of-the-milky-way/>
- « Essential Radio Astronomy (ERA) » - NRAO - <https://science.nrao.edu/opportunities/courses/era>

5 <http://www.obspm.fr/les-radiotelesopes-d-eu-hou.html>

6 <http://aav-astro.fr/blog/index.php/radio-astronomie/>

7 <http://www.qsl.net/4nec2/>

8 <https://arxiv.org/abs/1706.00936>

9 <https://www.poledesetoiles.fr/>

10 <https://realtime.obs-nancay.fr/>

11 <https://radiojove.gsfc.nasa.gov/>

12 <http://www.lesia.obspm.fr/perso/philippe-zarka/Chants.html>