# Un aperçu de la radioastronomie ou comment voir l'invisible !

Patrice

Plateau de Bure 2552 m d'altitude, dans le massif du Dévoluy (Hautes-Alpes) dans les Alpes françaises.

# Sommaire

- Le principe
- Lumière/radio
- Longueur d’onde
- Le premier radiotélescope
- Dimension
- Résolution
- Suivi
- Porto Rico
- En France aussi
- Améliorer la résolution
- Mars 2012 !
- Encore plus
- Le radiotélescope de Nançay
- En voiture !

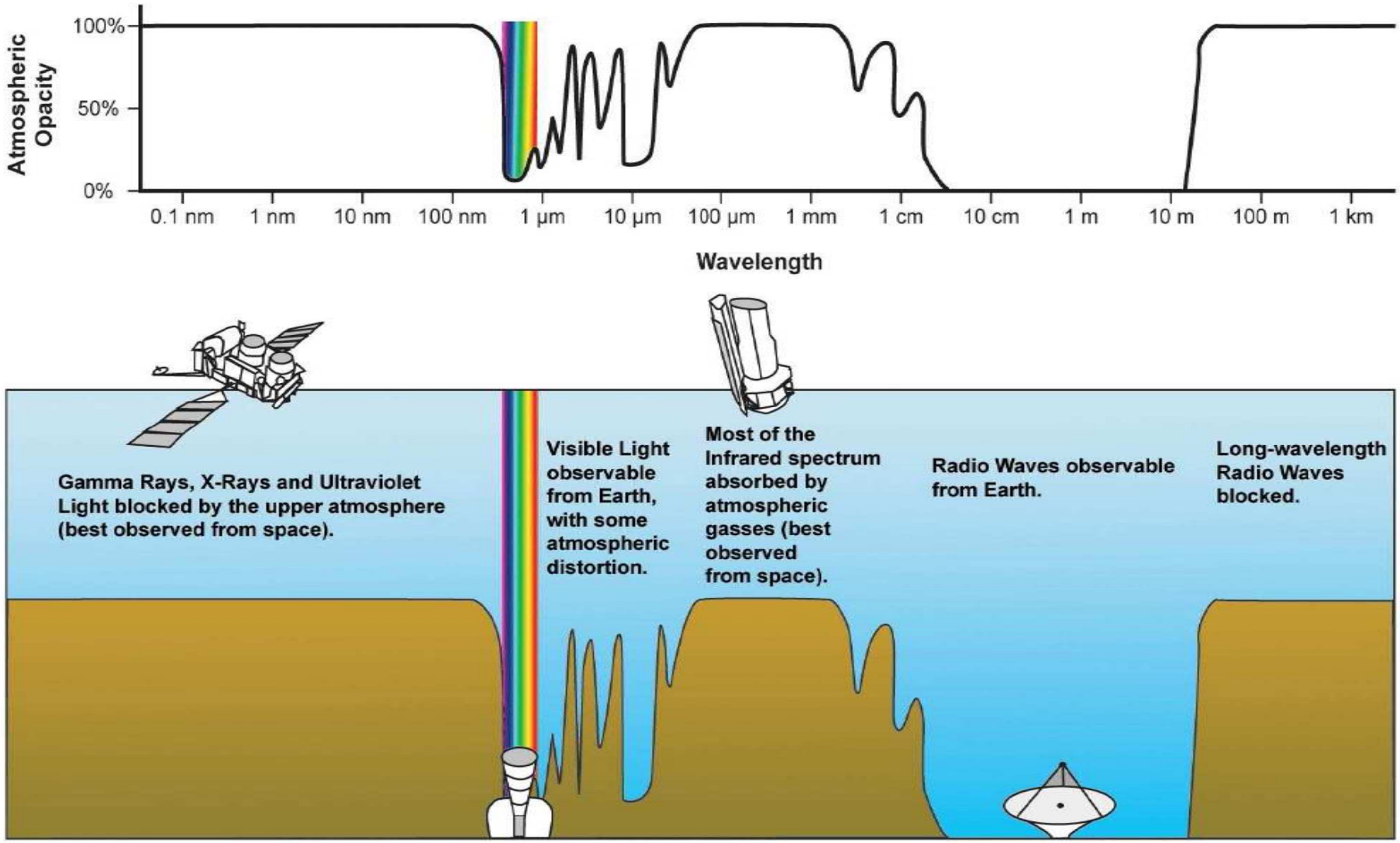
# Principe

- Le principe du radiotélescope est sensiblement le même que celui du télescope : il s'agit de recueillir un maximum d'ondes. Alors que les télescopes sont des entonnoirs à photons, les radiotélescopes sont, eux, de gigantesques oreilles à ondes radio. Pour améliorer le pouvoir de résolution des radiotélescopes, on va utiliser la plus grande parabole ou antenne possible.

# Lumière / Radio

- En astronomie, on utilise plusieurs types de rayonnements électromagnétiques : la lumière visible perçue à travers les lunettes et télescopes classiques ; l'ultraviolet, les rayon X et gamma, et les infrarouges pour la réception desquels nous nous servons de plus en plus, détectés par des satellites spécialisés et les rayonnements radio qui, eux, sont reçus et étudiés par les radiotélescopes terrestres.

# Longueur d'onde et absorption

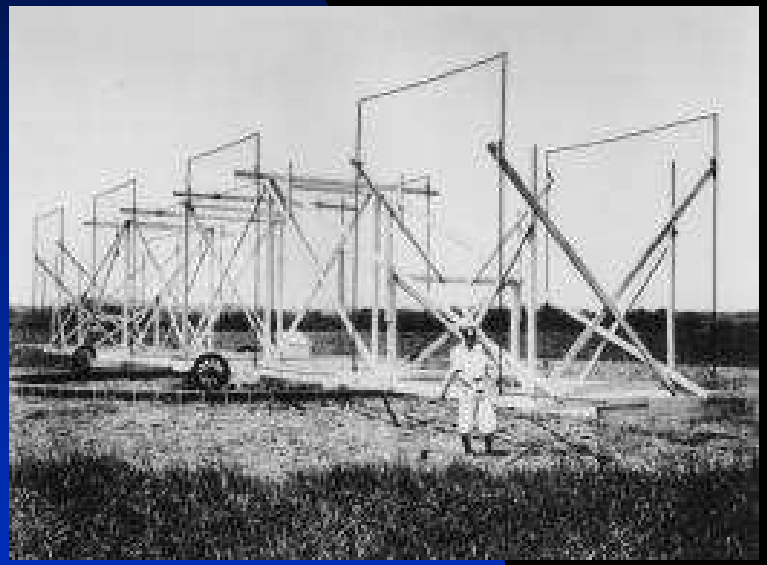


# Le premier radiotélescope

- On peut considérer que la radioastronomie date de 1931, lorsque l'ingénieur de la société Bell, Karl Jansky, découvre par hasard une source radio. Cherchant à résoudre le problème des parasites radio terrestres, il remarque un signal revenant périodiquement toutes les 23 h 56 min, soit la durée d'une rotation de la terre sur elle-même.
- En analysant plus précisément la provenance du signal, il s'aperçoit qu'il se situe dans la constellation du Sagittaire, soit au centre de notre galaxie. C'est la première source radio découverte. Mais cette technique a du mal à s'imposer et ce n'est qu'en 1936 que l'astronome amateur Grote Reber fabrique un radiotélescope. Il sera le seul à analyser le ciel en radio durant dix ans.

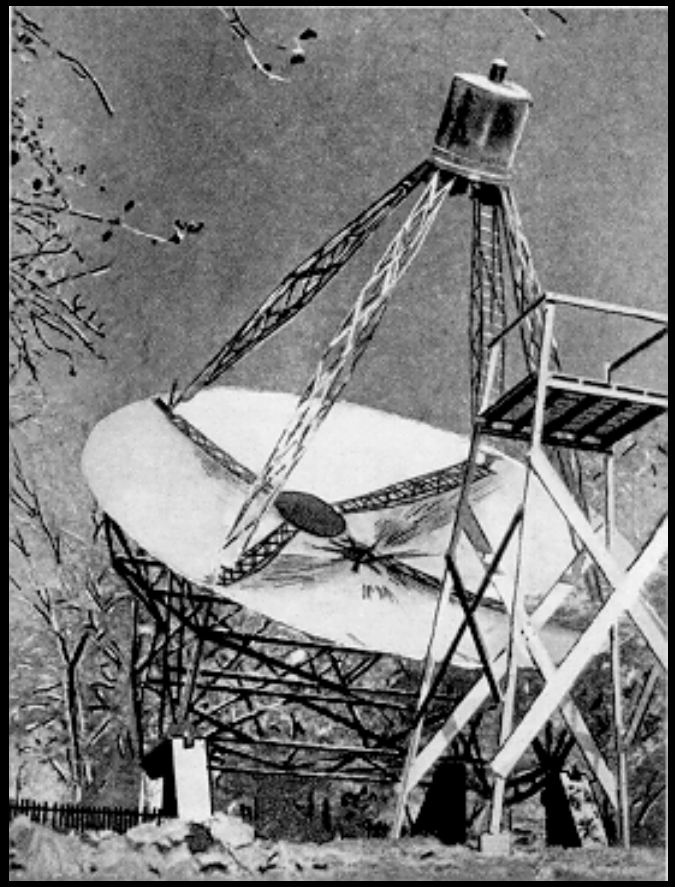
# Karl Jansky et Reber

1931



Karl Jansky

1936



Grote Reber

# Les débuts

- En 1944, un astronome hollandais, Van de Hulst prédit la production de rayonnement dans le domaine radio par les deux processus suivants :

  a) raies de recombinaison dans le domaine radio

  b) raie correspondant à la transition entre deux sous niveaux du niveau fondamental de l'atome d'hydrogène. Cette raie située à 21 cm fut observée dès 1951 et permettra l'investigation de la répartition de l'hydrogène neutre dans la Galaxie et un peu plus tard dans des galaxies lointaines.
- Grâce à ces deux suggestions, la radioastronomie avait conquis ses lettres de noblesse. Il existe d'autres processus de création de rayonnement radio en particulier le rayonnement synchrotron.

# Dimension de la parabole

- Les rayons sont concentrés en un point : le foyer, où l'on place le détecteur. La parabole n'a absolument pas besoin d'être aussi lisse qu'un miroir optique. En effet, pour que la focalisation se fasse correctement, les plus gros défauts doivent être d'une taille inférieure à la longueur d'onde. En optique cela correspond à environ 100 nm. Pour les ondes radios qui font plusieurs centimètres, on accepte un lissage assez grossier de la parabole.
- Autre avantage de la radioastronomie : elle est praticable de jour comme de nuit et par tous les temps ou presque.
- Sur une source circumpolaire, il est donc possible d'observer 24H/24 ce qui représente un intérêt non négligeable pour les phénomènes d'évolution rapide. Mais le grand défaut de la radioastronomie réside dans la mauvaise résolution des instruments.

# Le diamètre

- On remarque que si l'on augmente le diamètre du télescope, meilleure est la résolution. Mais on constate également que, si la longueur d'onde est élevée, on diminue cette dernière. Par exemple avec un radiotélescope de 100 m de diamètre et une longueur d'onde de 80cm (300Mhz) on obtient la médiocre résolution de 2000 secondes d'arc soit plus que la taille du soleil ! ( 0,5°*60' * 60'')
- En 1945 Groote Reber a construit lui-même une antenne parabolique de 9 m de diamètre. Il a établi, à la longueur d'onde de 1,87 m, la première carte du ciel montrant les isophotes (lignes qui émettent la même intensité lumineuse) de la Voie Lactée

# Résolution

- La radioastronomie s'est heurtée dès le début à son problème de fond : le pouvoir séparateur d'un radiotélescope est catastrophique. Ce n'est pas dû à une mauvaise construction, mais aux longueurs d'onde observées. Nous avons vu que le pouvoir séparateur d'un instrument est lié à son diamètre, mais nous nous sommes limités à la partie visible du spectre. Entre 0,4 et 0,7 µm, la variation de longueur d'onde est négligeable. Mais si on passe aux longueurs d'ondes radioélectriques, tout change.
- Le pouvoir séparateur d'un instrument dépend du diamètre ET de la longueur d'onde :
- $\theta = 1.22\lambda / D$ en radians soit $69,9\ \lambda / D$ en degrés.

# Très grand !

- A une longueur d'onde 10 fois plus grande correspond un pouvoir séparateur 10 fois plus mauvais. Or, les ondes radios utilisées en astronomie sont de l'ordre de la dizaine de centimètres ou du mètre, au lieu de 0,4 à 0,7 millièmes de mm en optique. Pour $\lambda$ = 1,87 m = 1.870.000 µm (Groote Reber), le pouvoir séparateur sera 1.870.000 / 0,5 = 3.740.000 fois plus mauvais que dans le visible pour un diamètre équivalent... Autant dire que sans l'imagination des radioastronomes, leur discipline serait morte dans l'oeuf.
- C'est pour cette raison qu'il n'existe pas de petit radiotélescope, mais bien au contraire des géants.

# Le suivi !

- Comme en optique, il faut suivre les objets à observer, et le plus simple pour cela consiste à monter l'instrument en équatorial. Le plus grand radiotélescope équatorial existant est celui d'Effelsberg en Allemagne, dont le diamètre du miroir atteint 100 mètres ! La seconde solution, pour construire des instruments encore plus grands, consiste à placer un miroir fixe, et à attendre que la source à observer veuille bien défiler devant par la rotation de la Terre. Évidemment, tout le ciel n'est pas accessible avec cette méthode, mais seulement une étroite zone autour du point visé par l'appareil. On mesure l'intensité du signal reçu et on la reporte sur un écran d'ordinateur : la brillance de chaque point sera proportionnelle au signal. On arrive comme cela à construire une image.

# Porto Rico

- On a construit en 1963, le radiotélescope d'Arecibo, à Porto Rico . Il mesure 305 m de diamètre et se trouve dans une cuvette naturelle en forme de parabole. La parabole elle-même ne peut pas se déplacer pour observer un objet précis. Il est en revanche possible d'orienter le détecteur, ce qui permet une observation de 20° de part et d'autre du point zénithal.

# Equatorial à Effelsberg

Ce radiotélescope a été construit en 1971. Sa distance focale est de 30 m, et la surface collectrice de 7.850 m2. La précision d'usinage de la surface est meilleure que 0,5 mm. La très grande surface de l'antenne  permet la détection de signaux radio extrêmement faibles, tandis que le grand diamètre (100 m) permet d'atteindre des résolutions angulaires (c'est-à-dire la possibilité de voir séparément, dans le ciel, deux objets très proches) particulièrement élevées. A une longueur d'onde de 1.3 cm, cette résolution est de 33 secondes d'arc, environ 2 fois meilleure que la résolution de l'œil humain dans le domaine de longueur d'onde optique .Le radiotélescope tourne sur un rail circulaire de 64 mètres de diamètre. Le poids total de la structure métallique est de 3200 tonnes. Il faut environ 12 minutes au télescope pour faire un tour complet de 360 degrés, tandis que la parabole peut s'élever de 90 degrés en environ 6 minutes. La quasi totalité du ciel peut ainsi être observée.

# Et en France ?

- Yves Rocard est le pionnier de la radioastronomie en France, qu'il a découverte pendant la Seconde Guerre mondiale en Angleterre, quand il était directeur de la recherche des Forces navales françaises libres. Il apprit l'existence du rayonnement radio du soleil, détecté par les radars anglais.
- Après la guerre, nommé directeur du laboratoire de physique de l'*École normale supérieure*, il constitua la première équipe française en radioastronomie : Jean-François Denisse, Jean-Louis Steinberg et Émile Jacques Blum.

# Paris puis Nançay

- Les premiers instruments furent installés sur le toit de leur laboratoire, rue Lhomond à Paris. Un miroir de projecteur américain de 1,5 mètre de diamètre, transformé en équatorial, observa les variations du rayonnement du soleil. Il fut détruit par une rafale de vent. Un autre miroir de 3 mètres fera des observations du soleil.
- Il installe les premières antennes de détection en région parisienne mais est rapidement gêné par le bruit de fond généré par l'activité humaine.
- Le terrain de 150 hectares à Nançay est choisi dès 1952, et acquis le 25 novembre 1953 : situé en pleine Sologne, le lieu est plat, peu habité, tout en restant proche de Paris.

# Améliorer la résolution

- C’est, en fait, dans l’interférométrie que réside la solution. Cette technique fait appel à l’utilisation de deux ou plusieurs radiotélescopes, relativement éloignés les uns des autres. En pointant une certaine source, l’onde radio doit parcourir une plus grande distance pour arriver à l’un des instruments par rapport à l’autre. En mesurant ces distances, on peut connaître précisément la position de la source. Une grande expérience d’interférométrie a été réalisée au Nouveau-Mexique avec le VLA (Very Large Array), où en 1980 ont été installées 27 antennes de 25 m de diamètre chacune. Mobiles et mises en interférométrie elles peuvent finalement former un instrument de 36 km !

# Mars 2012 !

- Quatre radiotélescopes, deux Coréens et deux Australiens, ont été reliés pour une même observation, amenant une résolution égale à celle d'un instrument de 8.000 kilomètres de diamètre, 100 fois supérieure à celle du télescope spatial Hubble. Pendant cinq heures, ils ont observé simultanément la même cible et leurs données ont été diffusées en temps réel à l'université de Curtin à Perth, en Australie, via un réseau de fibre optique. Les données ont été envoyées à partir de chaque télescope à raison de 64 mégaoctets par seconde, l'équivalent d'un **CD** toutes les 10 secondes.
- Ce n'est pas la première fois que l'Australie réalise un tel exploit. En 2010, une mise en réseau avec des instruments installés en Chine et en Europe avait constitué le plus grand radiotélescope au monde. Avec un diamètre de 12.300 kilomètres, il a été un court instant un système d'observation aussi grand que la Terre et ses 12.750 kilomètres de diamètre.

# Encore plus !

- Néanmoins les scientifiques n'en sont pas restés là : ils ont réalisé le VLBA (Very Large Baseline Array). Ici, au lieu de construire des paraboles relativement proches les unes des autres on utilise 10 radiotélescopes répartis dans le monde entier. En enregistrant les données recueillies et en les confrontant informatiquement dans un centre de traitement, on obtient un instrument qui fournit une résolution exceptionnelle : un millionième de seconde d'arc ! Ainsi on réalise un instrument de la taille de la terre. L'étape suivante consiste à aller dans l'espace, et à construire des radiotélescopes à l'échelle du système solaire : déjà, certains sites lunaires ont été retenus en vue d'y placer les premiers radiotélescopes extraterrestres.

# Bientôt

Le SKA, ou *Square Kilometric Array*, sera cinquante fois plus sensible que les meilleurs radiotélescopes actuels. La phase préparatoire du projet, qui vient de débuter, dispose de trois années pour en définir les grandes lignes.

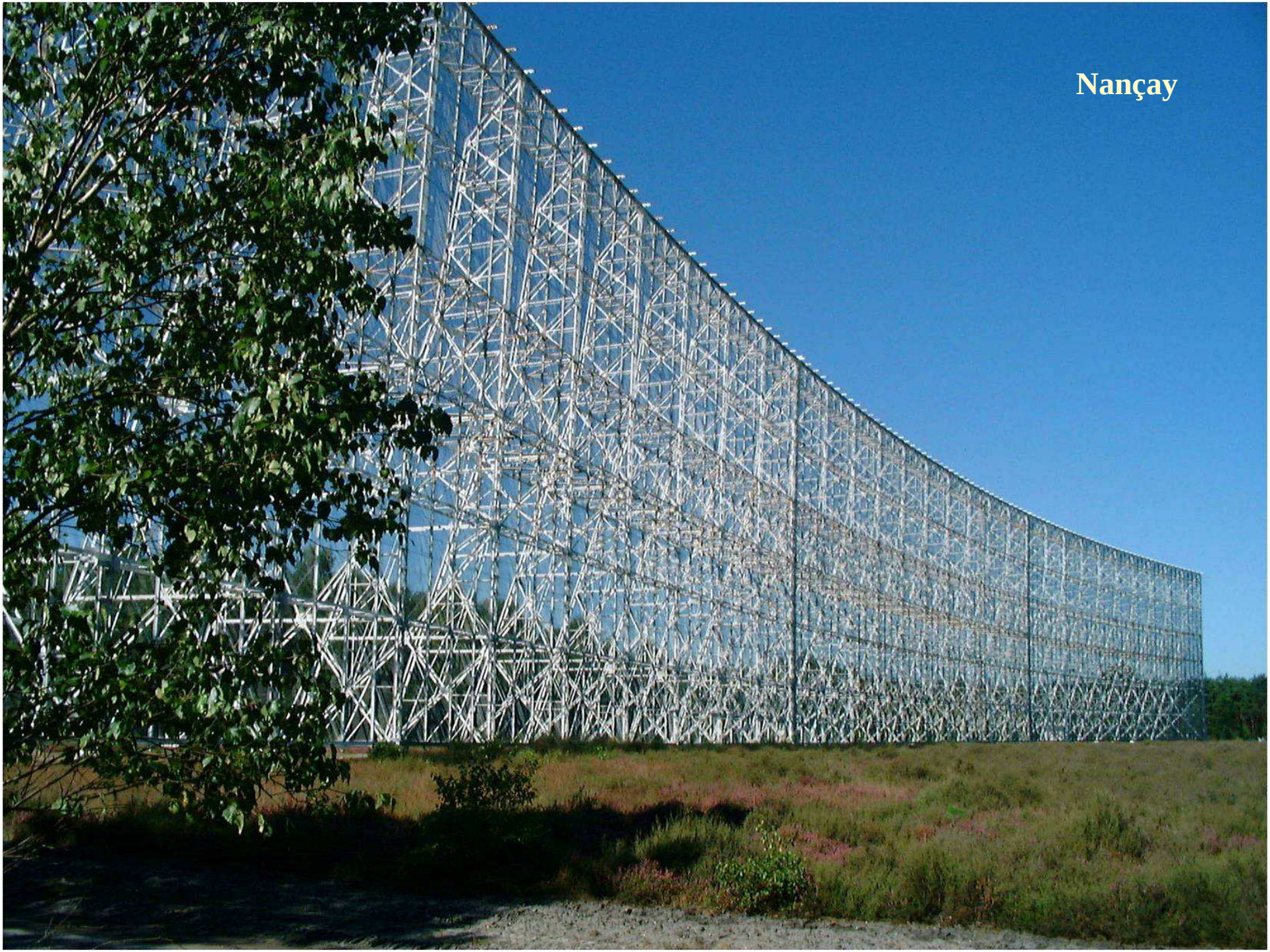
Rarement projet n'aura autant mérité la qualification de pharaonique. Quatre mille antennes paraboliques, ainsi que 200.000 mètres carrés de "tuiles", en fait des petites antennes en réseau, en constitueront la surface collectrice totalisant un kilomètre carré, l'ensemble étant réparti sur une distance de 3.000 kilomètres.
Les ambitions du dispositif en reflètent bien le gigantisme, et les radioastronomes s'attendent à disposer au moyen du SKA d'une puissance cinquante fois supérieure à celle du plus puissant radiotélescope actuel. La plage de fréquences initialement prévue, 0,10 à 25 GHz, pourra par la suite être étendue de 0,06 à 35 GHz. La configuration des récepteurs permettra d'observer simultanément plusieurs champs de vision indépendants, et ainsi d'effectuer des études comparatives difficilement réalisables aujourd'hui. La technique de l'interférométrie sera aussi largement utilisée, notamment dans l'observation et la résolution imagée de sources très éloignées.

Détail des antennes en réseau phasé (les "tuiles"). Vue d'artiste. Crédit : SKA

- **Australie ou en Afrique du Sud** ?
- La phase préparatoire, nommée PrepSKA, a été officiellement initiée lors d'une réunion en Australie du 7 au 11 avril dernier. Elle se donne pour principaux objectifs d'en définir les grandes lignes afin d'en évaluer précisément le coût, ainsi qu'en définir les modes de gouvernance et en établir cadre juridique. PrepSKA devra aussi se décider sur le lieu d'implantation du dispositif, l'Australie et l'Afrique du Sud se trouvant favorites.

Retour en France !

1956 : Les deux premières antennes, basées sur des radars allemands de type Würzburg Riese de 7,5 mètres de diamètre, furent utilisées en interférométrie jusqu'en 1962. Un des 2 est maintenant au mémorial de Caen


Nançay

# Le radiotélescope de Nançay

- En pleine forêt au coeur de la Sologne, loin des parasites urbains, s'élèvent les deux immenses réflecteurs du radiotélescope de Nançay, l'un des plus grands radiotélescopes du monde. Ce grand récepteur destiné à capter les émissions du ciel et notamment du soleil dans le domaine des ondes radio de 30 MHz à 10 GHz (10m à 3cm).
- Il a été inauguré le 15 mai 1965 par le général de Gaulle. Construit sous l'impulsion de l'École normale supérieure et de son directeur d'alors, André Donjon, il répond aux besoins de la France dans le domaine de la radioastronomie, qui était en pleine expansion depuis les années 1950. Fonctionnant depuis 47 ans, objet d'un entretien vigilant, régulièrement modernisé, il est encore aujourd'hui un des plus grands radiotélescopes du monde après celui d'Arecibo.

- Sur la station, une cinquantaine d'ingénieurs et de techniciens travaillent à l'entretien des instruments et au développement de nouvelles techniques. Une quarantaine de chercheurs, basés à Meudon, participent à ce développement et utilisent régulièrement les observations effectuées à Nançay.
- Les équipes de recherches du monde entier viennent travailler avec ces instruments ou consultent les données à distance grâce aux réseaux informatiques. D'une superficie totale de 7000 m², les réflecteurs de Nançay « écoutent » en permanence les ondes radioélectriques en provenance du cosmos.

# LE GRAND RADIOTELESCOPE

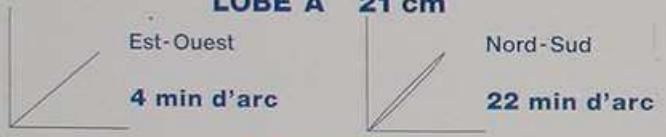
## ANTENNES

| | |
|---|---|
| miroir plan | 200m x 40m |
| miroir sphérique | 300m x 35m |
| antennes primaires | 3 cornets sur chariot mobile |

## FREQUENCES D'OBSERVATION

F = 1420 MHz (longueur d'onde = 21 cm raie de l'H)
F = 1665 MHz (longueur d'onde = 18 cm raie radical OH)
F = 3330 MHz (longueur d'onde = 9 cm raie radical CH)

## LOBE A 21 cm

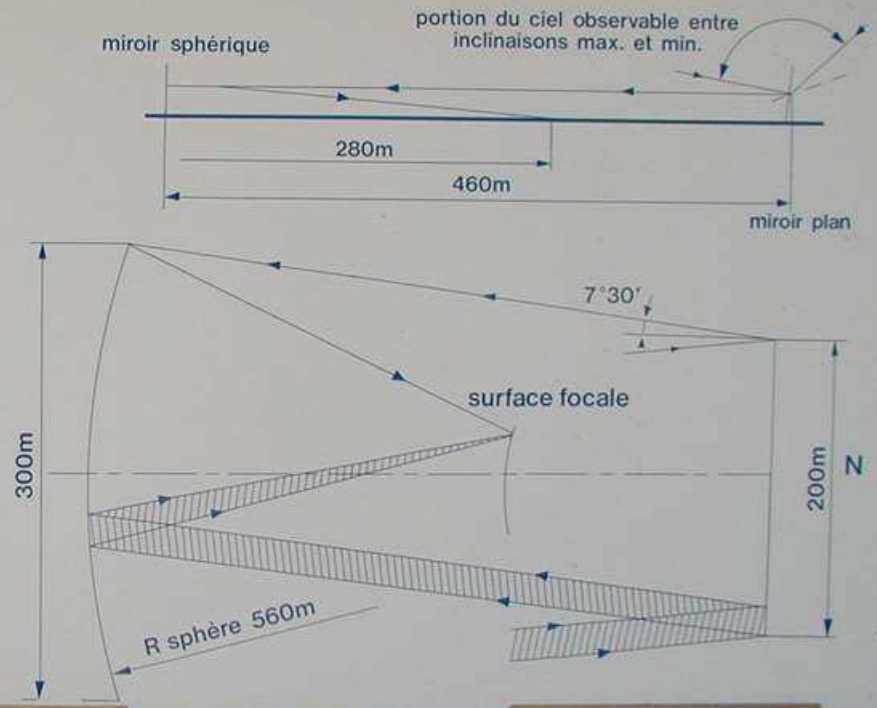



## POURSUITE

instrument méridien : 1h/jour

## SOURCES OBSERVEES

comètes - milieu interstellaire
observations galactiques et extragalactiques
recherche de signaux artificiels (SETI)



Réseau décamétrique
144 antennes hélicoïdales de 9m de haut, 5m de diamètre

# Radiohéliographe

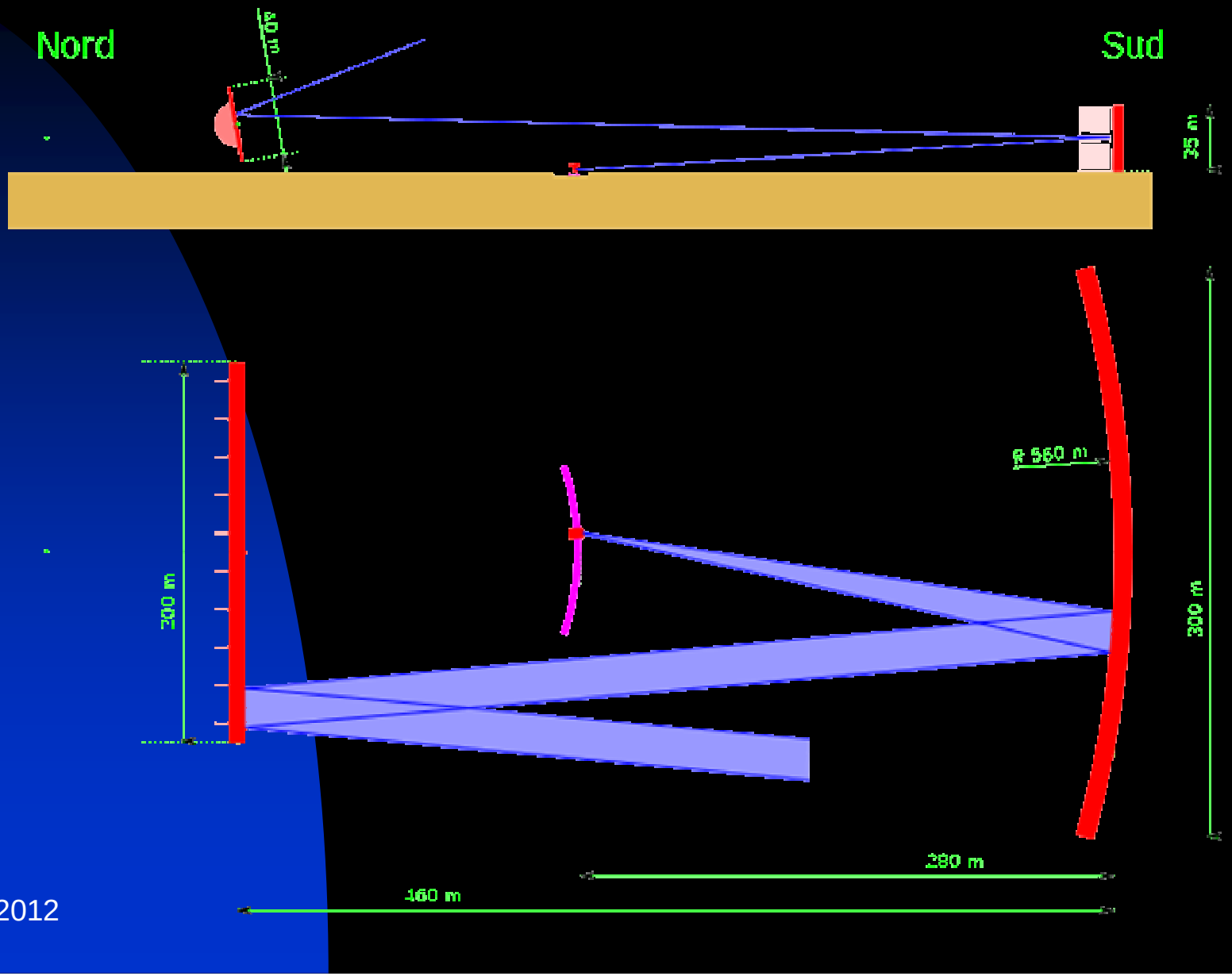
2 branches en forme de T

Nord-Sud et Est-Ouest

# Un radiotélescope non orientable

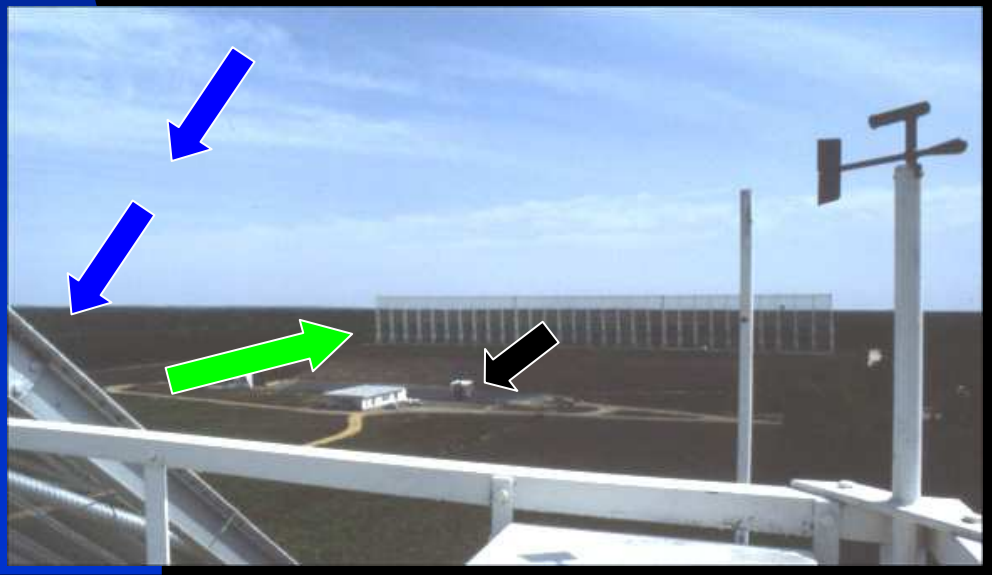
- Les montures ont des limites, qui sont atteintes pour des miroirs d'une centaine de mètres de diamètre. Pour aller plus loin, il faut sacrifier la mobilité, au moins en partie.
- Sacrifice partiel d'abord. On utilise le principe de l'héliostat (encore un instrument créé dans le visible...). Un miroir plan renvoie le faisceau vers le miroir principal, qui peut être fixe. C'est le principe qui a été retenu pour le radiotélescope de Nançay. Le miroir plan est mobile en hauteur (pivotant suivant un axe horizontal), mais pas en azimut. Il est dirigé vers le méridien sud, et ne peut renvoyer le faisceau que lorsque l'astre à observer passe dans le méridien. Alors, les ondes sont réfléchies vers le miroir principal qui est horizontal et fixe. Au foyer de celui-ci est placée l'antenne. Si les conditions énoncées ci-dessus étaient rigoureusement respectées, les observations ne dureraient qu'un fraction de seconde... Il faut donc les assouplir.

# La grande antenne



- On observera non pas au méridien strict, mais dans le voisinage du méridien. Ce qui veut dire que la source va se déplacer horizontalement dans le miroir principal. Si celui-ci était parabolique, comme on s'y attendrait, on aurait une image correcte seulement au méridien. Pour tolérer les mouvements, il faut que le miroir primaire soit sphérique. Ce qui introduit bien sûr une aberration de sphéricité, qu'il faudra corriger par ailleurs. Mais le faisceau se déplaçant, le foyer va se déplacer aussi, le long d'une ligne courbe, parallèle au miroir primaire. L'instrument permet une observation de l'ordre d'une heure, le foyer se déplaçant d'une soixantaine de mètres.
- Cette technique a été développée à Nançay et le miroir sphérique, pour simplifier la construction, n'est pas inscrit dans une calotte sphérique, mais dans une bande placée horizontalement. Il est fixe.

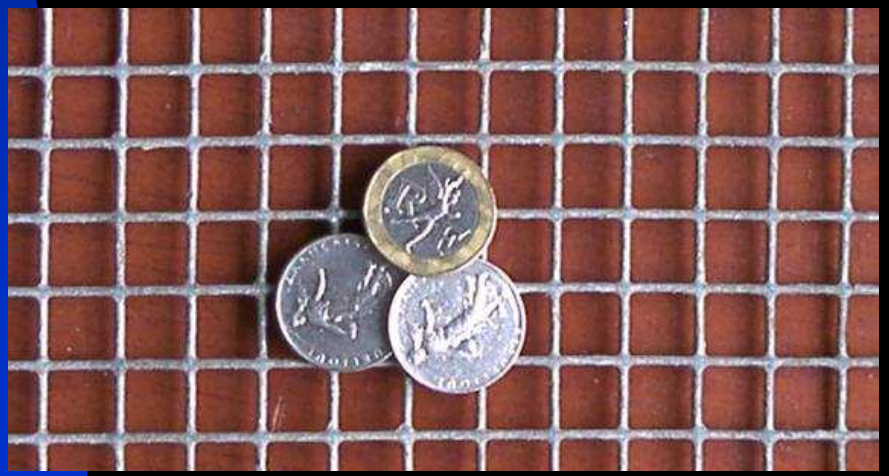
- On voit sur cette photo, au premier plan à gauche, une petite partie du miroir plan, incliné, qui renvoie les ondes du ciel vers le miroir sphérique, tout au fond de l'image. Ce dernier concentre le faisceau vers son foyer, où se trouve l'antenne de réception. Cette antenne est dans le tout petit bâtiment cubique au centre de l'image. L'antenne est mobile, elle se déplace sur une voie ferrée circulaire, afin de suivre le déplacement de la source pendant une durée raisonnable vis-à-vis des aberrations.
- Le miroir plan mesure 200 m de longueur, et 40 m de hauteur. Il est situé à 460 m du miroir sphérique. Le miroir sphérique est long de 300 m et haut de 35 m (remarquez qu'il est plus long que le miroir plan, pour permettre une utilisation prolongée) ; sa distance focale est de 460 m.
- Son pouvoir séparateur est de 1 minute d'arc à 6 cm de longueur d'onde, et de 3 minutes à 21 cm (la raie de l'hydrogène neutre). La précision de pointage est de quelques millièmes de degrés.
- Ce radiotélescope a été achevé en 1965.

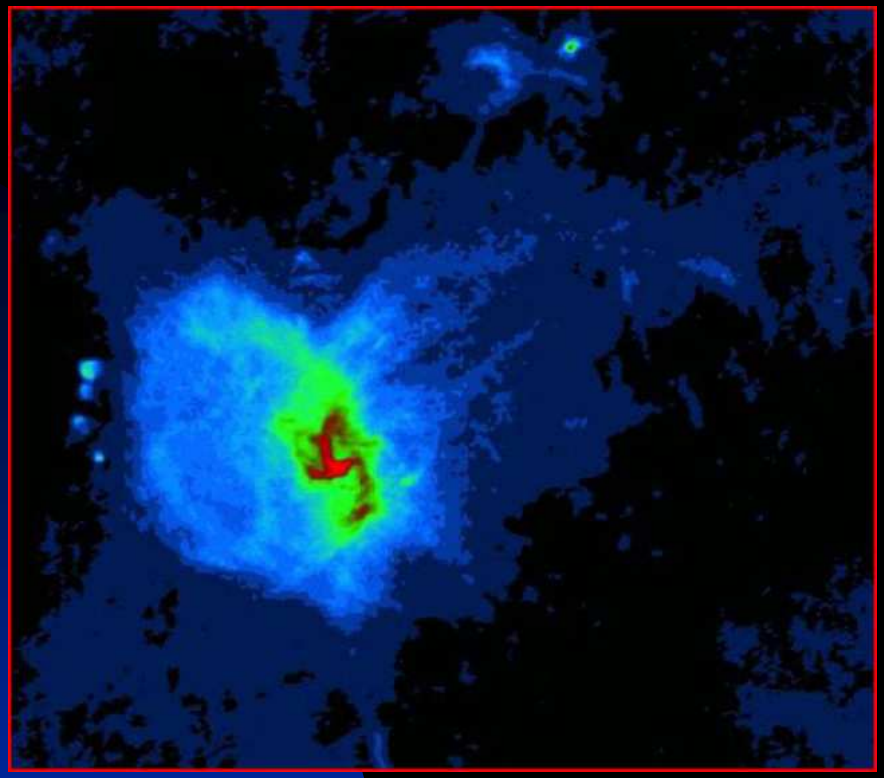


- Sur cette image, on voit le grillage qui sert de miroir plan, photographié depuis l'une des plateformes de service. Les longueurs d'onde observées étant supérieures à 6 cm, un grillage à mailles fines est suffisant pour constituer un très bon miroir. On voit, à gauche et vers le bas, l'axe qui permet d'incliner le miroir plan, pris dans l'un des paliers qui le supportent.

# Le « miroir »

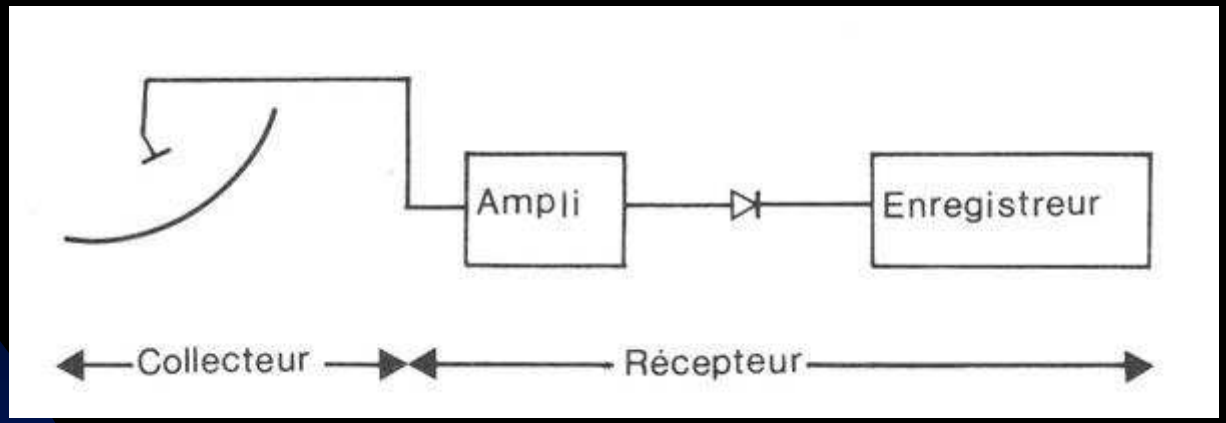
- Le collecteur est constitué d'un "miroir" à face métallique. La dimension de ces mailles doit être inférieure à λ / 10 afin de préserver la qualité des "images" formées par ce collecteur. Pour la longueur d'onde 21 cm, λ / 10 # 2 cm, la surface du collecteur sera donc un grillage pour des observations dans le domaine des ondes centimétriques ; par contre si λ = 1 mm, λ / 10 = 0,1 mm, dans ce cas, la surface doit être complètement métallisée.





**La source Sagitarius A au centre de notre galaxie en ondes radio**

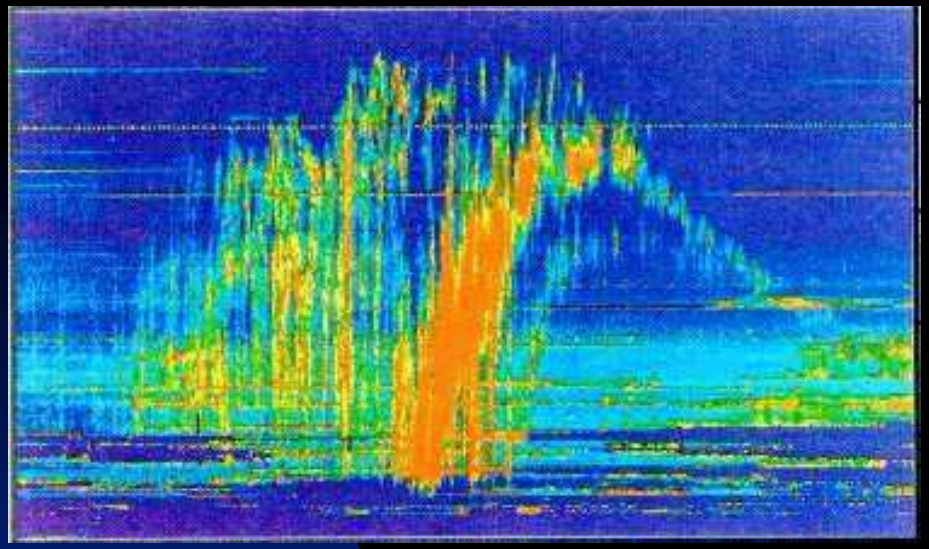
- Un radiotélescope ne donne pas d'image visuelle de ce qu'il observe.
- Il reçoit des signaux qui une fois amplifiés, sont restitués par analyse, de façon à obtenir des cartes des différents objets célestes observés. Le radiotélescope de Nançay est spécialisé dans les études galactiques et extragalactiques. Plusieurs instruments le constituent.




- Les champs électromagnétiques collectés y sont très faibles. Ils induisent des courants électriques tout aussi faibles (quelques microvolts) qui sont amplifiés par les récepteurs proprement dits, d'une très haute sensibilité et d'une grande stabilité. Le tout est ensuite analysé pour construire des cartes célestes. À l'origine, la vocation du radiotélescope de Nançay était l'étude des galaxies. C'est aujourd'hui toujours le thème principal de ces recherches, auxquels il faut ajouter l'étude du soleil, des comètes, des galaxies extraordinairement lointaines (jusqu'à 2 milliards d'années-lumière), ou encore de pulsars.

**Le Soleil à 327 MHz**

- Le radiohéliographe constitué de deux réseaux d'antennes perpendiculaires, observe la structure et l'activité de la couronne solaire. Le premier réseau, orienté est-ouest, comprend 16 antennes de 3 m de diamètre auxquelles s'ajoutent deux antennes de 10 m, le tout aligné sur 3200 m. Le second réseau, orienté nord-sud, comprend 24 antennes de 5 m de diamètre sur une base de 1250 m de longueur. Le but de ces observations est de parvenir à prévoir l'intensité de l'activité solaire. Le radiospectrographe multi-canal surveille également le soleil mais plus précisément ses sursauts radioélectriques.



**Observation de Jupiter avec le réseau décamétrique**
sursauts “”millisecondes”
gamme de fréquence 10-40MHz
(1h30)

- Il fournit ainsi des spectres des événements agitant la couronne solaire et même du milieu interplanétaire. Certaines ondes planétaires, décamétriques, sont également étudiées.
- C’est le cas de Jupiter qui présente un champ magnétique très intense. Le réseau décamétrique de Nançay observe ces émissions grâce à 144 antennes en forme d’hélice, inclinées de 20° par rap port à la verticale. Ces instruments sont sans cesse améliorés. La sensibilité du radiotélescope a été augmentée d’un facteur 100 depuis sa mise en service. Grâce à ces progrès constants, le site de Nançay maintient son rang et sa contribution à la radioastronomie mondiale.

# LOFAR

- En construction en 2010, **LOFAR** (abréviation de *LOw Frequency ARray* : « grille à basses fréquences ») est un ensemble d'interféromètres qui sera utilisé en radioastronomie et constituera le plus grand radiotélescope du monde. Les postes seront installés dans plusieurs pays européens dans le but d'obtenir une aire d'observation supérieure au 1 km2. Lofar est un ensemble de 50.000 antennes regroupées dans 48 stations, elles-mêmes réparties dans cinq pays européens. 40 aux Pays-Bas, 5 en Allemagne, une en France, une en Grande-Bretagne et une en Suède.

- Ces antennes captent les courtes longueurs d'onde radio. Elles reçoivent les ondes des rayonnements émis par les gaz froids entourant la formation des planètes, des exo planètes, des étoiles et des galaxies.
- Les signaux radios collectés (de l'ordre de 3 Gbits /s) sont envoyés par fibre optique vers un superordinateur situé à Groningue (Pays-Bas) et qui calcule l'ensemble des données d'interférométrie envoyées par l'ensemble des stations. La station Lofar de Nançay est connecté à RENATER le réseau haut débit (10 Gbits/s) français en fibre optique qui sert à la recherche, l'éducation et à l'enseignement.

# Sources

- Raphaëlle Bouchardon http://web.cala.asso.fr/ ( que je remercie pour son accord dans l'utilisation de son article )
- Wikipédia
- Le site web du radiotélescope de Nançay http://www.obs-nancay.fr/
- Et plein d'autres sur Internet !

# Conclusions

- Cet exposé n'est qu'un résumé non exhaustif de la radioastronomie.
- Le domaine est en effet très vaste.
- Je n'ai pas abordé l'étude de certaines longueurs d'onde en particulier. Cette étude mérite un ou plusieurs exposés à elle seule.
- Le but était de préparer notre visite du radiotélescope de Nançay et d'essayer de vous faire découvrir quelques maillons de cette approche de l'astronomie de l'invisible !
- Alors en voiture !