



Opinions Libres

le blog d'Olivier Ezratty

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : radiotélescopes

Après une première partie dédiée à un rappel sur les **dimensions de l'Univers**, et les trois suivantes consacrées aux télescopes optiques terrestres, je vais ici m'intéresser à une catégorie bien à part de télescopes, les radiotélescopes.

L'Univers nous arrose régulièrement en particules diverses (neutrinos, ...), ondes électromagnétiques et aussi ondes gravitationnelles. Seules les ondes de lumière visibles et proches du visible, les ondes radio et les ondes gravitationnelles ne sont pas bloquées par l'atmosphère. Les autres ondes électromagnétiques comme les rayons X et gamma ou une bonne part de l'infrarouge moyen et lointain ne peuvent pas être captés sur terre et ne le sont que par des télescopes spatiaux que nous examinerons dans une autre partie de cette série d'articles.

Les ondes radio passant bien, tout du moins entre 1 cm et 30 m de longueur d'onde (10MHz à 30 GHz, sachant que plus la longueur d'onde est grande, plus la fréquence est faible et réciproquement) et moyennement bien dans les ondes millimétriques (entre 1 mm et 1 cm), pourquoi donc ne pas en profiter ? Qui plus est, elles sont observables jour comme nuit. Elles sont émises par de nombreux objets célestes : les galaxies de toutes sortes, et dans tous leurs états (naissance, développement, évolution, fin de vie), les phénomènes extrêmes (pulsars pour les étoiles à neutrons en rotation, quasars pour les galaxies avec un noyau très actif), les étoiles (idem), ainsi que les nuages de gaz comme de poussières et notamment ceux qui sont le prélude à la création d'étoiles. Elles sont même émises par l'Univers dans son histoire la plus reculée, 380 000 ans après le big bang, dans ce que l'on dénomme le bruit de fond diffus cosmologique, ou **CMB** pour Cosmic Microwave Background.

Pour capter ces ondes, les astronomes et astrophysiciens font appel à diverses catégories de radiotélescopes que nous allons examiner. Ce sont des engins à la fois très imposants, très originaux et variés. On y trouve des télescopes à antenne parabolique, à antenne non parabolique, et avec des arrangements à base d'antennes multiples dans les deux cas, mettant en œuvre de l'interférométrie pour créer des images à haute résolution à partir de l'information collectée par plusieurs antennes ou paraboles. Que captent-ils et comment fait-on pour reconstituer des images du cosmos dans les ondes radio ? Surtout dans la mesure où les longueurs d'onde sont grandes et qu'il n'existe pas de capteurs d'images à même de capter les ondes radio ? Ce sont ces mystères scientifiques et techniques que je vais essayer de lever. Vous découvrirez aussi des télescopes méconnus comme le **South Pole Telescope**, ceux de l'**IRAM** français installés à Nancay et en Espagne ainsi que l'étonnant **LOFAR**, un interféromètre géant déployé dans plusieurs pays européens.

Comme pour les articles précédents, j'ai compulsé un grand nombre de sources d'informations pour constituer et illustrer cette compilation de radiotélescopes. J'ai notamment apprécié les **excellents cours d'ASTRON**, l'organisme de radiotélescopes publics des Pays Bas, un des pionniers européens dans le domaine. Avec en tout, 11 présentations passionnantes. Face à cela, je suis comme un enfant dans un grand magasin de jouets. Tout est à portée de main et gratuit, mais le temps est la matière première la plus rare pour tout absorber (et parfois, comprendre) toute cette somme de connaissances ! Donc, je vais vulgariser ! Malgré la vulgarisation que les spécialistes du sujet jugeront plus qu'extrême, cet article fait tout de même 29 pages au format A4 ! Ce

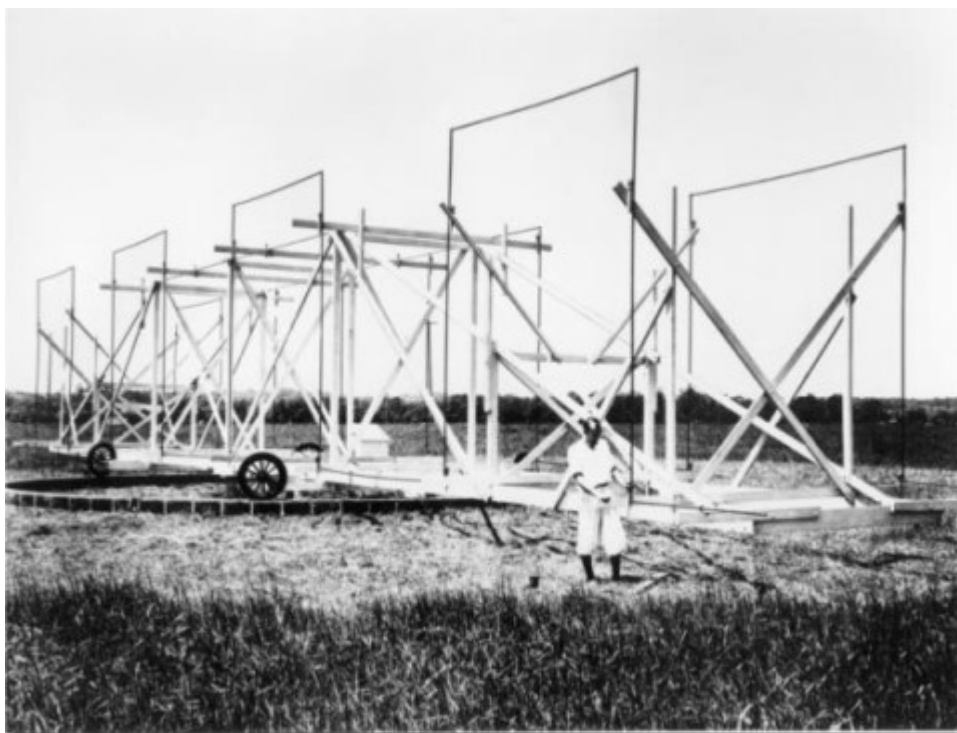
sont les devoirs de vacances 2017 !

Voici donc ce que j'ai pu en tirer !

Grandes découvertes de la radio astronomie

Un peu comme le Post-it de 3M, la radioastronomie est une découverte accidentelle. Elle résulte de travaux liés aux débuts du développement des télécommunications radio longue distance. Celles-ci ont été perfectionnées aux débuts du XXe siècle avec la première liaison à basse fréquence (<100 kHz) réalisée par Marconi en 1901, suivie de l'usage des ondes courtes en 1920 (1,5 MHz) puis des ondes longues en 1927 par AT&T (60 kHz) et puis en 1929, l'usage d'ondes courtes entre 9 et 21 MHz, toujours par AT&T. Ces télécommunications étaient gênées par des interférences dont l'origine n'était pas toujours comprise.

Travaillant dans les Bell Labs, l'ingénieur **Karl Jansky** (1905 – 1950) cherchait à déterminer les fréquences optimales dans les ondes courtes pour gérer ces télécommunications radio transatlantiques. Voulant déterminer l'origine de parasites qui interviennent dans les transmissions par ondes radio courtes qui se manifestaient sur la fréquence de 20,5 Mhz, il fabriqua une grande antenne directionnelle fixe mais captant les ondes au gré de la rotation de la terre (*ci-dessous*).

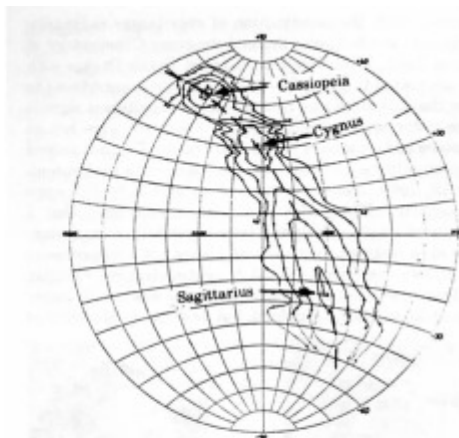


Après plus de deux ans d'observations, il constata que la fréquence de la perturbation radio était d'environ une journée (23 heures et 56 minutes correspondant au jour sidéral). Elle correspondait de plus au moment où l'antenne pointait dans une même direction du ciel, la constellation du Sagittaire, qui correspond au centre de la Voie Lactée. Il en déduit que les parasites provenaient de celle-ci et pas d'une source terrestre. On était en 1932 et la découverte fut publiée début 1933. Karl Jansky publia même une carte du ciel indiquant la source de ces ondes radio.



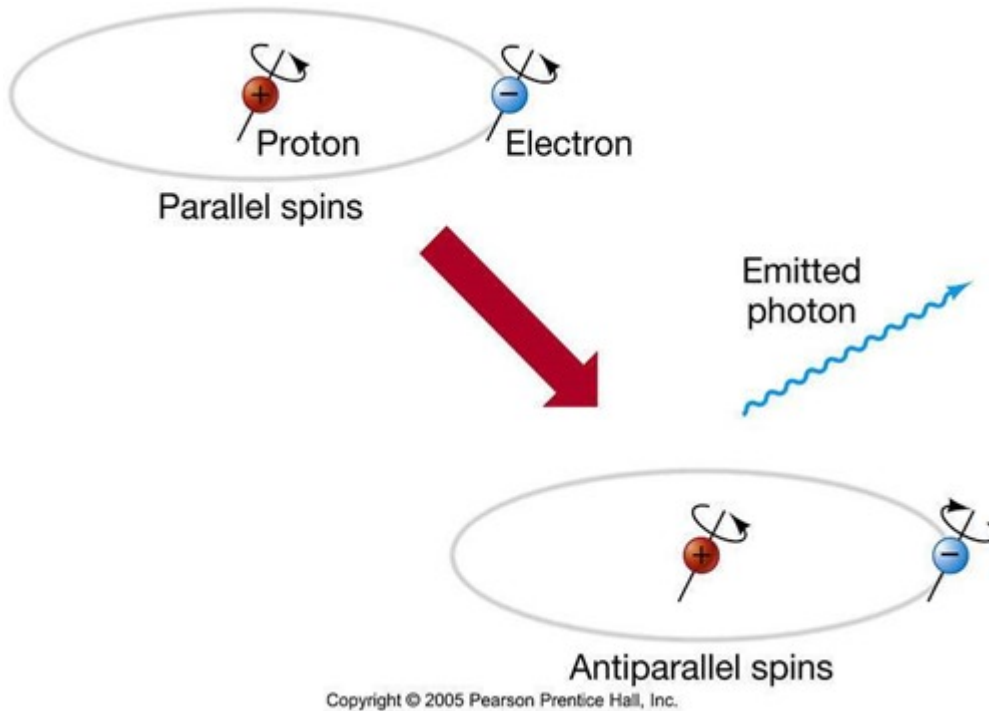
L'ingénieur fut malheureusement affecté à d'autres tâches dans les Bell Labs. C'est un autre ingénieur radio américain, **Grote Reber** (1911 – 2002), qui en tira plus tard parti en devenant le premier véritable

radioastronome. Il construisit le premier radiotélescope parabolique en 1938, permettant de concentrer les ondes radio sur un capteur dont nous découvrirons plus loin la nature. Entre 1939 et 1947, il explora plusieurs fréquences : 3300 MHz (9 cm) adaptée à la captation des ondes radio d'origine thermique, puis 910 MHz (33 cm), 160 MHz (187 cm) et 480 MHz (62 cm). Il s'en servit pour détecter les structures de la Voie Lactée, (re)découvrant un pic d'ondes radio dans la constellation du Sagittaire et surtout, sa structure en disque aplati, ainsi que diverses autres galaxies dont la radio-galaxie Cygnus A, située à 600 millions d'années lumière. Il découvrit aussi que les ondes radio cosmiques étaient d'origine non thermique.



First map of the radio sky as produced by Grote Reber showing strong sources of radiation in Cassiopeia, in Cygnus and in Sagittarius, the center of the galaxy, the region from which Karl Jansky had detected radio emission.

Arrive un troisième larron, le hollandais **Hendrik Van Der Hulst**. Il prévoit en 1944 que la fréquence de changement de spin d'électron de l'hydrogène génère une onde radio de 21 cm qui devrait être détectable (1420 MHz) en radioastronomie. Elle correspond à un changement d'état énergétique de l'hydrogène neutre – non ionisé ou attaché à d'autres atomes dans des molécules – qui intervient dans les nuages de gaz des galaxies. Lorsque les atomes d'hydrogène rentrent en collision, ils changent de niveau énergétique. Après un certain temps, les atomes d'hydrogènes reviennent à leur niveau énergétique bas et émettent un photon dans cette fréquence de 1420 MHz. Et 5% à 10% de la Voie Lactée est composée d'hydrogène atomique ! Donc, une belle source de recherche !



L'émission de cette fréquence de 1420 MHz par la Voie Lactée fut validée en mars 1951 par **Harold Ewen** et **Edward Purcell** de l'Université d'Harvard, exploitant une antenne en forme de corne (*ci-dessous*). Leurs données furent confirmées en mai de la même année par les astronomes hollandais **Richard Muller** et **Jan Oort** et les Australiens **Wilbur Christiansen** et **Jim Hindman**.

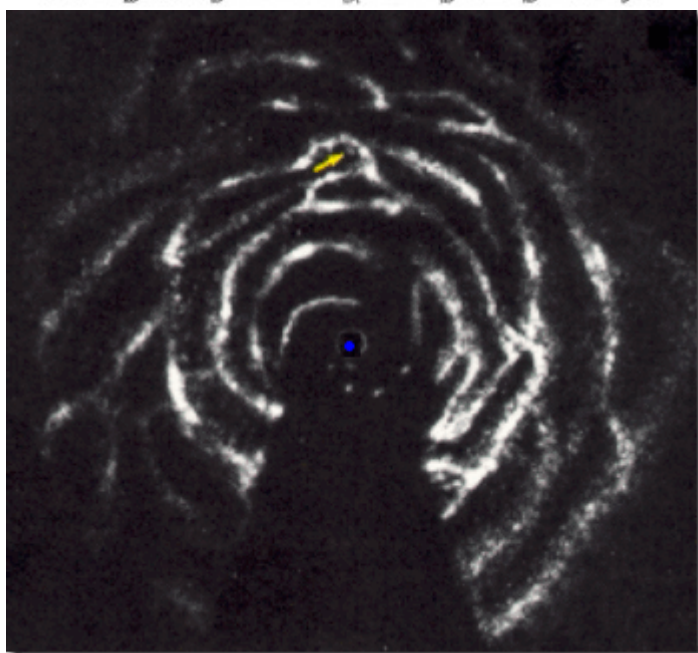
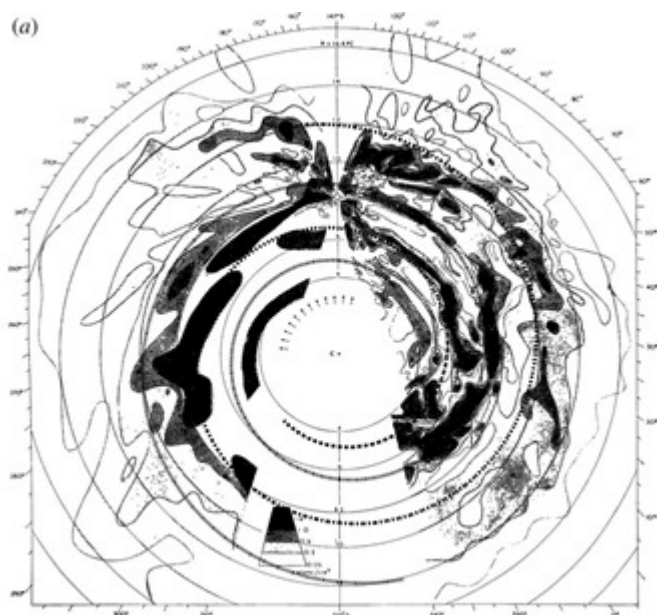


Elles permirent en 1952 de commencer à cartographier la structure en spirale de la Voie Lactée. En tenant compte de l'effet Doppler sur la raie spectrale de l'hydrogène, il était possible d'évaluer sa vitesse de rotation, comme, plus tard, de la rotation d'autres galaxies vues sur la tranche (comme ci-dessous avec la galaxie M33, la couleur artificielle reflétant l'éloignement ou le rapprochement des deux lobes de la galaxie). On a

notamment observé que la vitesse de rotation angulaire dans la Voie Lactée ne dépendait pas de la distance au centre. C'est ce qui sous-tend l'hypothèse de l'existence d'un halo de matière noire (de nature inconnue) complétant la poussière et les gaz connus de la galaxie. La matière noire est depuis plusieurs décennies une sorte de Graal de l'astrophysique. Tout le monde en parle mais personne ne l'a jamais observée directement. Son existence est inférée par d'autres observations et par l'application des lois connues de la physique (gravité, théorie de la relativité générale).



Le signal radio est analysé par transformées de Fourier pour identifier la raie spectrale H1 et ses répliques correspondant aux différents bras de la Voie Lactée observée (*source*). Cette découverte marqua le véritable début de la radio astronomie comme une discipline scientifique bien à part. Ci-dessous à gauche, la cartographie de la Voie Lactée dans son état en 1958, réalisée par Jan Oort, Frank John Kerr et Gart Westerhout.



En 1955, **Bernie Burke** et **Kenneth Franklin** détectaient des ondes radio provenant de Jupiter avec l'antenne de Mills Cross alors que les émetteurs d'ondes radio étaient alors bien plus distants.

S'en suivirent de nombreuses découvertes qui continuent jusqu'à ce jour. A commencer par celle du premier quasar – ou quasi-stellar radio sources – découvert par **Maarten Schmidt** et **Bev Oke** en 1963 (3C 273) et situé à deux milliards d'années lumières de votre chaumière. Cette détection de quasar réalisée d'abord dans les radio-fréquences était ensuite confirmée optiquement par le télescope Hale du Mont Palomar, mettant en évidence un glissement vers le rouge de son spectre radio (longueur d'onde plus longue). Les ondes radios correspondantes ne sont pas d'origine thermique. Elles proviennent de phénomènes gravitationnels extrêmes.

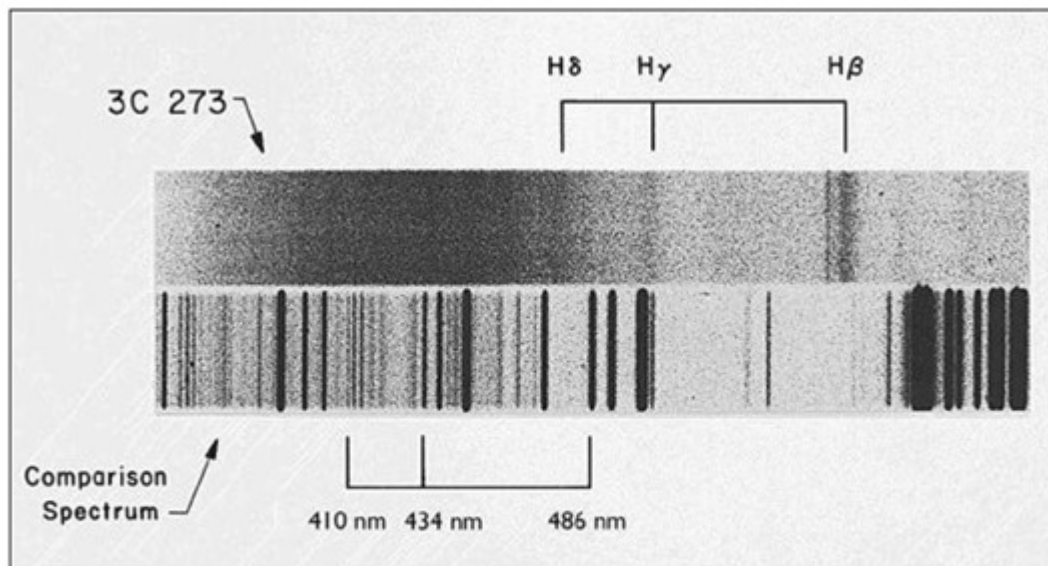
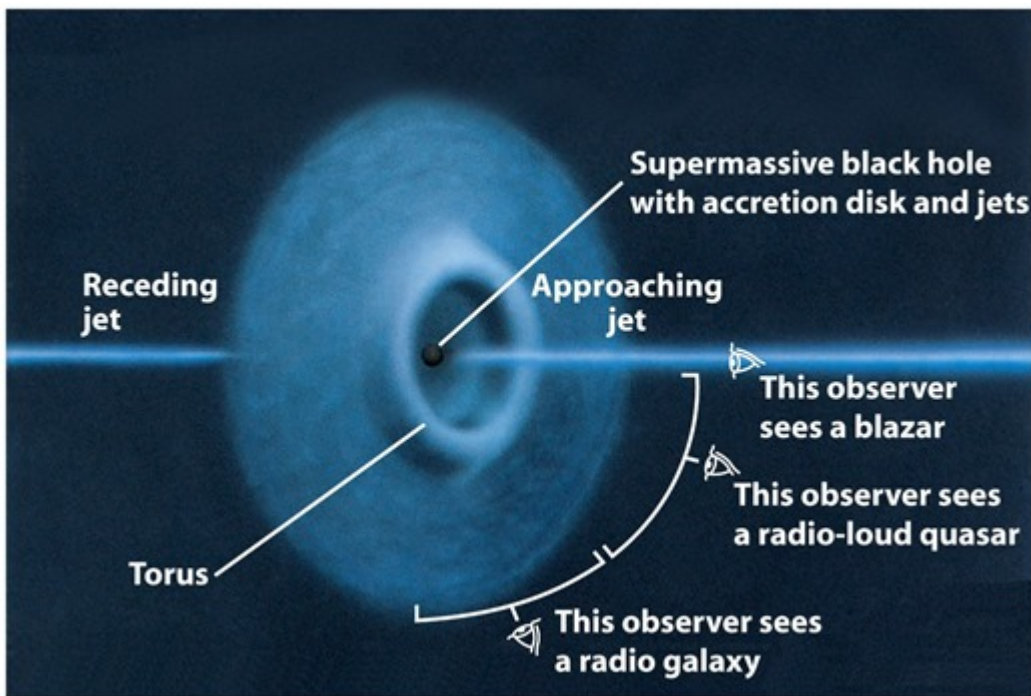


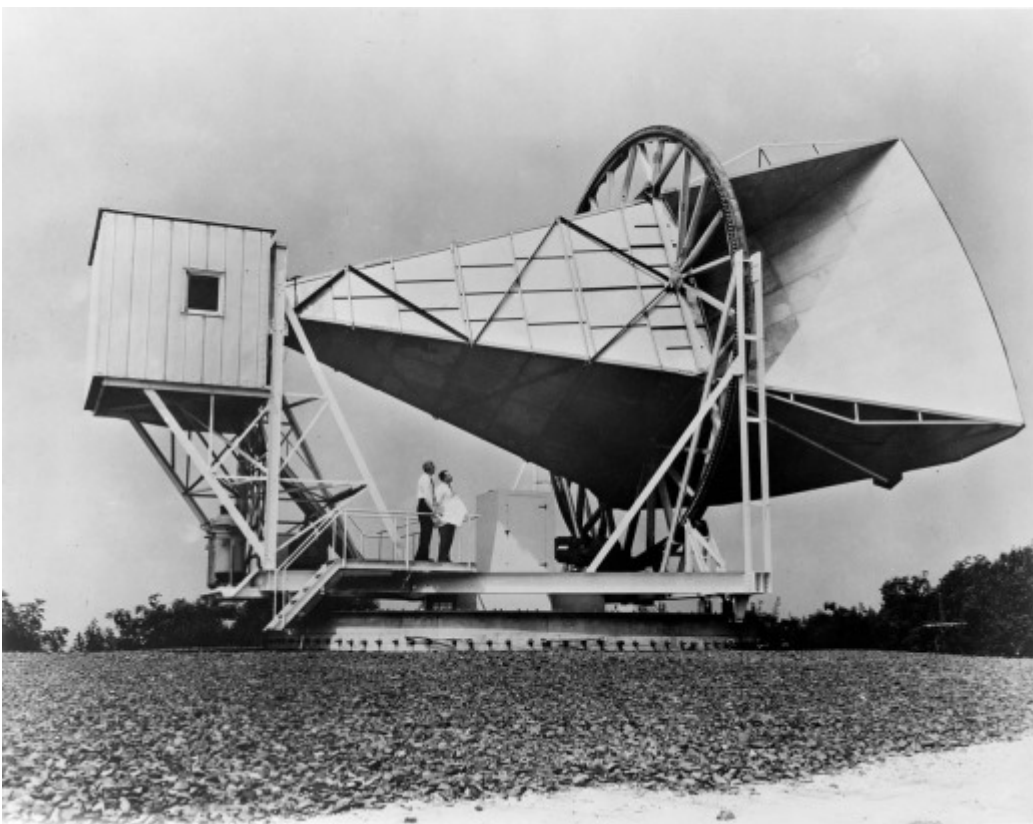
Figure 10: The spectrum of 3C 273 obtained with the 200-in Palomar telescope (courtesy: Maarten Schmidt).

Un quasar est une source très puissante d'ondes radio située à plusieurs milliards d'années lumières de la Voie Lactée. Elle peut être cent fois plus puissante qu'une galaxie. La fréquence élevée de leur luminosité qui se compte en semaines ou années implique que ces sources soient relativement petites, de l'ordre de quelques semaines à années lumières. Les quasars font partie du groupe plus large des noyaux galactiques actifs (AGN = Active Galactic Nuclei).

Les AGN sont des noyaux de galaxie dont l'intense activité énergétique n'est pas liée à leurs étoiles, mais en général à des trous noirs super-massifs qui avalent de la matière par effet gravitationnel, 10% de cette matière pouvant être transformée en énergie dans le processus, expliquant la forte luminosité observée. Ils sont entourés d'un disque d'accrétion de gaz et matière en rotation – évaluée par spectrométrie – et de jets de matière perpendiculaires à ce disque (*schéma ci-dessous*). Les AGN peuvent avoir été créés par la rencontre de galaxies, propulsant de la matière dans leur noyau au sein duquel se trouverait toujours un trou noir. Ce sont des phénomènes anciens dans l'histoire de l'Univers car on ne les observe pas à moins de quelques milliards d'années lumière de notre galaxie. Lorsque l'on observe un AGN de face, le jet de matière à son centre vire vers le bleu, indiquant qu'il va dans notre direction et sort donc du trou noir. On appelle cela un blazar !

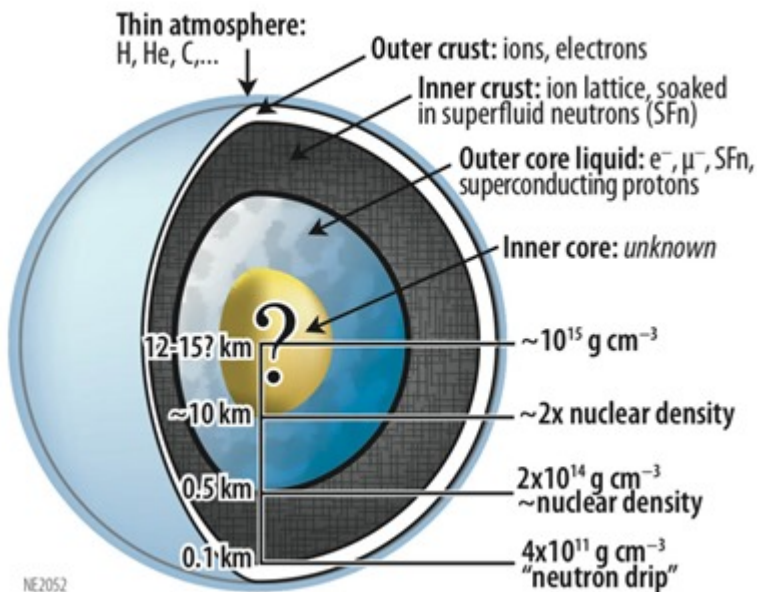


En 1965, les radioastronomes des Bell Labs **Arno Penzias** et **Robert Wilson** découvraient le bruit de fond diffus cosmologique (CMB = cosmic microwave background), dont le pic de fréquences est situé autour de 160 GHz dans les bandes radio millimétriques. Ils utilisèrent pour cela un télescope doté d'une corne de 6 mètres de largeur, construit par Harald Friis, le créateur de l'antenne de Karl Jansky deux décennies plus tôt (*ci-dessous*).



En 1967, c'était autour de **Jocelyn Bell-Burnell** et **Antony Hewish** de découvrir les pulsars à Cambridge au Royaume Uni alors que la première y était doctorante en astronomie (vidéo de son TEDx en 2013). Les pulsars sont des étoiles à neutrons très puissantes. Les étoiles à neutron sont des étoiles hyper-denses composées

notamment de neutrons et de protons, en rotation rapide sur elle-même, jusqu'à mille fois par seconde. Elles émettent des ondes radio périodiques directionnelles à haute fréquence et un fort champ magnétique. Elles naissent dans les explosions de supernovas [source du schéma]. En 2013, 2200 pulsars avaient été détectés.



Puis, en 1970, **Arno Penzias**, **Robert Wilson** (déjà vus en 1965 pour la découverte du CMB) et **Keith Jefferts** découvraient la présence de monoxyde de carbone avec le télescope parabolique de 12 mètres à ondes radio millimétriques de l'observatoire de Kitt Peak en Arizona. Les découvertes issues de radiotélescopes n'ont fait que continuer depuis !

Types de radio télescopes

Les radiotélescopes sont de trois types principaux :

- A base de **réflecteurs**, le plus souvent paraboliques, qui renvoient les ondes radio vers un récepteur. Les exemples les plus connus sont les radiotélescopes d'Arecibo (Porto Rico), Effelsberg (Allemagne), Lovell (Angleterre) et Green Bank (USA). Les antennes sont fixes ou mobiles selon les cas. Comme pour les télescopes optiques, les télescopes paraboliques utilisent divers systèmes de réflecteurs secondaires voire tertiaires. Le montage le plus courant est de type grégorien avec antenne, réflecteur et instruments montés derrière une ouverture dans l'antenne et recevant les rayons d'un réflecteur secondaire monté en vis à vis de l'antenne principale. Il est aussi courant dans les télescopes optiques. Cela permet notamment d'obtenir une longue focale et de permettre un fort agrandissement sans que l'installation soit trop grande dans la longueur. Ces télescopes captent bien les signaux faibles mais avec une résolution moyenne.
- A base de **réseaux d'antennes** fixes sans pièces mobiles qui permettent de viser dans le ciel grâce au déphasage du signal reçu par les antennes en fonction de sa direction. On en trouve notamment à l'observatoire de Nancay en France avec le NDA et le LOFAR. Ils sont adaptés à la détection d'objets émettant un fort rayonnement, comme le cœur de la Voie Lactée, car ils sont peu sensibles. Par contre, ils apportent une bonne résolution à la détection.
- Des jeux de plusieurs télescopes de l'un des deux types précédents mettant en œuvre **l'interférométrie** qui améliore la résolution angulaire des observations sans avoir à créer de télescopes géants qui sont...

impossibles à fabriquer. Comme pour l'interférométrie optique que nous avons survolée avec les télescopes optiques des deux parties précédentes, l'interférométrie radio utilise la combinaison des signaux captés par des antennes individuelles pour reconstituer une image 2D plus précise des objets observés. L'interférométrie apporte une bonne résolution aux images générées. Si les antennes sont des paraboles, cela ajoute aussi de la sensibilité à la détection qui est proportionnelle à la somme de la surface des antennes utilisées.

Les radiotélescopes captent tout ou partie du bruit large bande des objets observés, appelé émission continuum. Le continuum radio cumule la totalité du flux d'ondes radios reçues. Il est produit par trois principaux mécanismes :

- **L'émission thermique** dont l'intensité est proportionnelle à la température du corps observé selon la loi de Rayleigh-Jeans. Elle provient souvent de corps noirs, ceux qui absorbent toutes les radiations qu'ils reçoivent, comme le sont les étoiles. Ils en émettent en respectant la loi de Stefan-Boltzmann selon laquelle la luminance égale la constante de Stefan-Boltzmann multipliée par la température du corps.
- **L'émission non-thermique** qui résulte de l'interaction entre particules très énergétiques avec des champs magnétiques, que l'on trouve surtout dans les pulsars, les quasars, les galaxies radio et les restes de supernovas. Pour les électrons quasi-relativistes, ils s'agit d'émission synchrotron. Ces émissions peuvent être polarisées, d'où l'intégration de polarimètres dans les instruments des télescopes, aussi bien dans le visible que dans les ondes radio.
- **Le rayonnement continu de freinage** dit *Bremsstrahlung*, généré par l'accélération de particules chargées dans un champ électrique. L'analyse de ces émissions radio sert à estimer la densité électronique et les champs magnétiques en présence.

L'analyse de ce continuum passe le plus souvent par de la spectrométrie, l'analyse du spectre des fréquences reçues. Celui-ci comprend généralement des bosses diverses liées aux émissions des corps noirs, ainsi que des pics et des creux en fonction des fréquences absorbées ou émises par les corps analysés ou de ceux qui se sont intercalés entre la cible et le radiotélescope comme les nuages de gaz et de poussières. La spectrométrie en ondes radio est généralement réalisée via de l'interférométrie que nous verrons dans l'épisode suivant, et qui combine les signaux de plusieurs antennes.

Particularités des radiotélescopes à antenne parabolique

Les radiotélescopes à antenne parabolique ont quelques points communs et différences avec les télescopes à miroirs réfléchissants, que nous avons pu découvrir dans les deux dernières parties de cette série. Dans les similitudes, ces miroirs réfléchissent éventuellement les rayons électro-magnétiques vers un réflecteur secondaire voire tertiaire, puis vers un capteur. Mais cela s'arrête là.

Tout d'abord, la **résolution angulaire** des télescopes est toujours proportionnelle à la longueur d'onde observée divisée par le diamètre de l'antenne ou la distance entre les antennes pour un interféromètre. Les ondes radio ont des longueurs d'onde bien plus grandes que celle des rayons lumineux, ultra-violet ou même infrarouge. Les rayons visibles sont compris entre 380 et 780 nanomètres. L'infrarouge proche est situé entre 750 nm et 1,5 microns. L'infrarouge moyen, utilisé dans divers télescopes optiques, va de 1,5 à 4 microns. Les ondes radio couramment explorées dans les radiotélescopes vont de 1 mm à 30 cm, la longueur d'onde la plus observée initialement étant le 21 cm de l'hydrogène comme nous l'avons déjà vu. Les longueurs d'onde plus courtes permettent la détection de molécules dans les étoiles et galaxies, telles que l'eau, le CO, l'ammoniaque (NH₃),

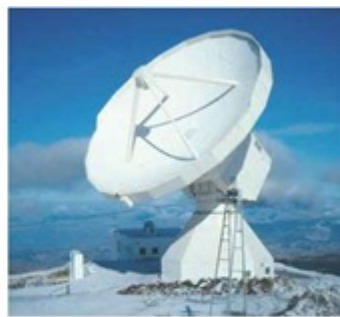
le fer et le cyanure d'hydrogène (HCN). Les ondes millimétriques et centimétriques font partie des micro-ondes. Une bonne part des radiotélescopes récents fonctionnent dans ces bandes millimétriques. Certains télescopes spatiaux comme Herschel couvraient l'infrarouge lointain et les ondes millimétriques, qui sont adjacentes.

En prenant comme référence le vert à 500 nanomètres, le différentiel de taille d'antenne correspondant à l'observation de l'hydrogène en 21 cm est de 420 000 ! Vu autrement, un radiotélescope avec une antenne de 100 m va avoir une résolution angulaire 42 000 fois plus faible qu'un télescope optique doté d'un miroir de 10 m ! Cela explique pourquoi les images générées par les radiotélescopes sont généralement très pixélisées. Sur les grandes longueurs d'onde radio, la résolution angulaire sur la bande de 21 cm sur un radiotélescope de 100 m est équivalente au quart de celle du soleil, soient 500 secondes d'arc. D'où l'usage de l'interférométrie qui est plus fréquente en radiotélescopia que dans l'observation visible et infrarouge. Des interféromètres de plusieurs kilomètres voire centaines ou milliers de kilomètres de large permettent d'atteindre une résolution angulaire plus respectable, quoique toujours faible par rapport à celle des télescopes optiques.

La longueur d'onde explorée a aussi un impact sur la **structure de l'antenne**. Celle-ci est maillée pour les grands télescopes. Le maillage ne doit pas être plus grand que la demi-longueur d'onde. Les télescopes de grande taille explorent des ondes plus longues et sont donc maillés. Ce qui tombe bien car cela permet de les alléger et de mieux résister au vent. Les lois scientifiques ont du bon ! A contrario, les télescopes opérant dans les ondes millimétriques ont une surface plane, sans trous, et qui doit être la plus parfaite possible avec une tolérance qui s'exprime en dizaines de microns. Les antennes principales ou les réflecteurs qui sont les équivalents des miroirs secondaires des télescopes optiques peuvent aussi être mobiles et adaptatifs pour corriger les effets de déformation des rayons électromagnétiques induits par l'atmosphère, en particulier dans les ondes millimétriques.



radiotélescope Parkes à ses débuts
gros maillage, grandes longueurs d'ondes



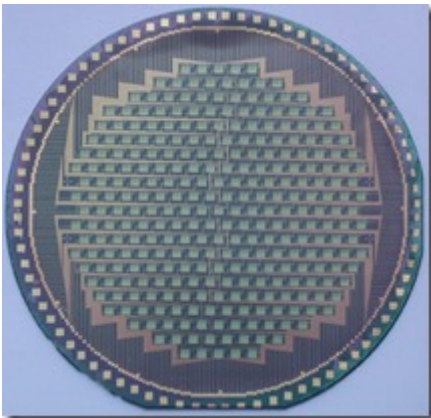
radiotélescope IRAM en Espagne
surface lisse, ondes millimétriques

Autre différence clé, celle des **capteurs d'ondes radio**. Dans les télescopes optiques ou infrarouge, le capteur est un CCD qui met en jeu l'effet photo-électrique. Celui-ci consiste à convertir chaque photon reçu en électron mobile dans un capteur à base de semi-conducteur. Dans les radiotélescopes, les photons d'ondes radio reçus sont de puissance bien trop faible pour déclencher cet effet photo-électrique. On utilise donc des capteurs différents : des résistances dont la valeur en Ohm dépend de la température. Ce sont des thermistances. L'outil s'appelle un bolomètre. Recouvert de noir, il chauffe légèrement après avoir reçu les ondes radio, qui sont éventuellement amplifiées dans un tube métallique. Le courant qui traverse ce thermomètre est amplifié par des récepteurs analogiques qui sont très sensibles. On obtient une valeur analogique qui est ensuite convertie en valeur numérique. Les bolomètres peuvent être refroidis à très basse température pour avoir une grande sensibilité, en général avec de l'hélium liquide. Le refroidissement et l'amélioration de ces composants a permis d'améliorer rapidement la sensibilité des capteurs de radiotélescopes pendant les années 1960 et 1970.



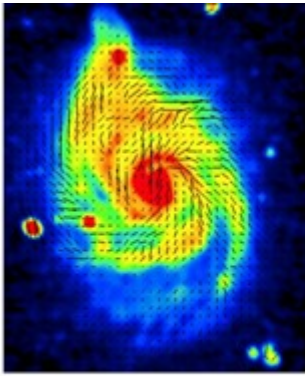
Les bolomètres servent à mesurer les ondes radio mais également les rayons X, l'infrarouge lointain, et les ondes radio sub-millimétriques. Leur taille qui est optimisée pour la détection de fréquences données. Plus la longueur d'onde est grande, plus doit l'être le bolomètre. Les hautes fréquences générées par un bolomètre sont généralement filtrées pour ne conserver qu'une bande étroite comme celle du changement de spin de l'électron de l'hydrogène atomique, à 1420 MHz – 21 cm.

Les bolomètres utilisés dans les radiotélescopes sont soit uniques, générant un seul pixel d'information, soit par groupes dont la taille varie en fonction de la longueur d'onde à observer, soit sous forme d'arrangements en toile d'araignée de capteurs (*ci-dessus*) ou matricielle (*ci-dessous*) pour les ondes les plus courtes comme les ondes millimétriques.

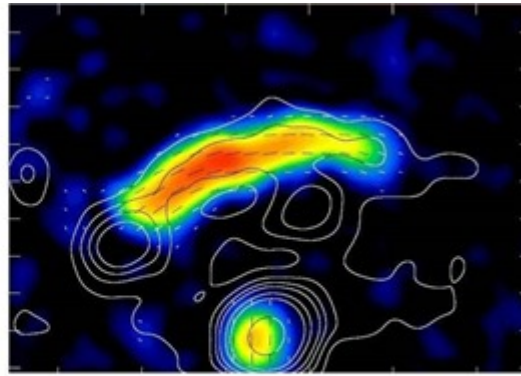


Une image de radiotélescope est générée en utilisant un télescope fixe et en laissant la Terre tourner ou en déplaçant l'antenne pour couvrir une partie du ciel, pixel par pixel ou bloc de pixels par pixels. Dans le cas de l'utilisation de matrices, l'image est générée par combinaison des images obtenues par les bolomètres matriciels, avec quelques transformations numériques au passage.

Les radiotélescopes sont aussi équipés de **spectrographes** qui analysent le spectre électromagnétique et permettent d'en déduire la composition de matière des objets observés. Ils sont aussi couplés à des **polarimètres** qui permettent de déterminer la polarité des ondes électromagnétiques reçues. Cette technique est d'ailleurs aussi utilisée dans les télescopes optiques. Une polarisation des ondes radio reçues est le signe de présence d'un fort champ magnétique dans la source d'émission de radio, source que l'on trouve par exemple dans les pulsars et dans les galaxies (exemples *ci-dessous*).



champs magnétique de la galaxie M51
obtenu en interférométrie avec le VLA
© Mpifr Bonn, Beck, Horellon, Neiningner



amas galactique CIZA J2242+53 à 2 milliards d'années lumières
lignes d'intensité d'émission radio sur 3 cm vue par le radiotélescope
Effelsberg en Allemagne. Les couleurs représentent les lignes de
polarité magnétiques des ondes reçues.
© M. Kierdorf et al., A&A 600, A18

Nous avons évoqué la pollution lumineuse qui empêchait dans les zones peuplées d'observer les étoiles à l'œil nu. Les télescopes optiques sont généralement installés en altitude, là où la pollution lumineuse est minimale, sans compter l'intérêt d'avoir une atmosphère sèche. La **pollution par ondes radio** est évitée en radioastronomie. Dans la pratique, les bandes de fréquences utilisées en radio-astronomie sont protégées dans les plans de fréquence officiels via l'ITU (International Telecommunication Union). Ainsi, les scientifiques ont obtenu que les bandes les plus critiques du spectre radio ne soient pas utilisées par les opérateurs télécoms et autres utilisateurs d'ondes radio, comme les transports aériens ou les militaires. Le plan d'allocation de ces bandes de fréquence bâti en 1959 a constamment évolué : en 1963, 1971, 1979, 1995 et 2003 [source : **Craft Handbook for Radio Astronomy, 2005**].

Ce sont notamment celles qui correspondent à l'observation de l'hydrogène neutre (à 1420 MHz), du radical OH (à 1612, 1665 MHz, 1667 MHz et 1720 MHz) et du deutérium (327 MHz). Ces fréquences entourent des bandes couramment utilisées comme le 433 MHz de certains objets connectés et télécommandes ou le 1,8 GHz de la 4G. Il n'empêche que certains télescopes comme le récent FAST chinois sont tout de même installés dans des zones non habitées pour éviter toute forme d'interférence d'origine humaine. Par contre, les radiotélescopes n'ont pas besoin d'être situés en altitude car l'atmosphère est transparente vue des ondes radio.

TAB. 1.1 – Bandes dédiées à la radioastronomie (extraits des allocations ITU).

Allocation ITU RR	Types d'observation
13.36 - 13.41 MHz	Soleil, Jupiter
25.55 - 25.67 MHz	
37.5 - 38.25 MHz	Jupiter
73.0 - 74.6 MHz	Soleil
150.05 - 153.0 MHz	Continuum, pulsar, Soleil
322 - 328.6 MHz	Continuum, deutérium
406.1 - 410 MHz	Continuum
608 - 614 MHz	VLBI
1330 - 1400 MHz	Raie HI red-shiftée
1400 - 1427 MHz	Raie HI
1610.6 - 1613.8 MHz	Raies OH
1660 - 1670 MHz	
1718.8 - 1722.2 MHz	
2655.0 - 2700.0 MHz	Continuum, HII
3100.0 - 3400.0 MHz	Raies CH
4800.0 - 5000.0 MHz	VLBI, HII, raies H ₂ CO et HCOH
6650.0 - 6675.2 MHz	CH ₃ OH, VLBI
10.60 - 10.70 GHz	Quasar, raies H ₂ CO, Continuum
14.47 - 14.50 GHz	
15.35 - 15.40 GHz	
22.01 - 22.21 GHz	Raie H ₂ O red-shiftée
22.21 - 22.5 GHz	Raies H ₂ O
22.81 - 22.86 GHz	Raies NH ₃ , HCOOCH ₃
23.07 - 23.12 GHz	Raies NH ₃
23.6 - 24.0 GHz	Raie NH ₃ , Continuum
31.3 - 31.8 GHz	Continuum
36.43 - 36.5 GHz	Raies HC ₃ N, OH
42.5 - 43.5 GHz	Raie SiO
47.2 - 50.2 GHz	Raies CS, H ₂ CO, CH ₃ OH, OCS
51.4 - 59.0 GHz	
76.0 - 116.0 GHz	Continuum, raies moléculaires
123 - 158.5 GHz	Raies H ₂ CO, DCN, H ₂ CO, CS
164.0 - 167.0 GHz	Continuum
168.0 - 185.0 GHz	H ₂ O, O ₃ , multiples raies
191.8 - 231.5 GHz	Raie CO à 230.5 GHz
241 - 275 GHz	Raies C ₂ H, HCN, HCO ⁺
275 - 1000 GHz	Continuum, Raies moléculaires

Enfin, les antennes de radiotélescopes ont la particularité d'être **réversibles**. Elles peuvent être utilisées pour émettre des signaux. Ce sont elles qui permettaient de communiquer avec les missions Apollo, qui s'est appuyé sur le télescope australien Parkes, qui a aussi reçu les signaux TV de la mission. Ce sont aussi elles qui permettent de communiquer avec les satellites. Dans la pratique, on utilise des antennes paraboliques dédiées pour ces communications comme celles du **Goldstone Deep Space Communications Complex** de la NASA situé dans le désert de Mojave avec des antennes paraboliques de 34 et 70 mètres. Le radiotélescope d'Arecibo a été de son côté utilisé pour émettre des signaux codés à l'intention d'extra-terrestres !



Grands radiotélescopes paraboliques

Passons maintenant en revue quelques-uns des plus grands radiotélescopes paraboliques (source de cette liste) par année de mise en service. Le schéma ci-dessous fait un inventaire des radiotélescopes européens et de quelques autres radiotélescopes étrangers, la liste complète étant bien entendu bien plus longue.

Dwingeloo (Pays-Bas, 1956) est doté d'une antenne de 25 m précise seulement à 1 cm près. C'était le premier grand radio télescope à antenne orientable. Il était calé sur les fréquences de 1390 MHz et 1420 MHz pour l'étude de l'hydrogène. Il a notamment permis de découvrir le centre de la Voie Lactée via son nuage d'hydrogène. Suivirent des études affinant la connaissance de la structure complexe de notre galaxie, de sa rotation et la découverte de galaxies invisibles avec les télescopes à miroirs et de nuages d'hydrogènes dans d'autres galaxies comme celle d'Andromède. Ce radiotélescope a été décommissionné en 1998 mais est utilisé depuis les années 2000 par des astronomes amateurs.



Jodrell Bank Lowell Telescope (UK, 1957) a une antenne orientable de 76 m qui pèse 1500 tonnes (source photo). Située au sud de Manchester, c'était la plus grande antenne du monde lors de sa mise en service. Il

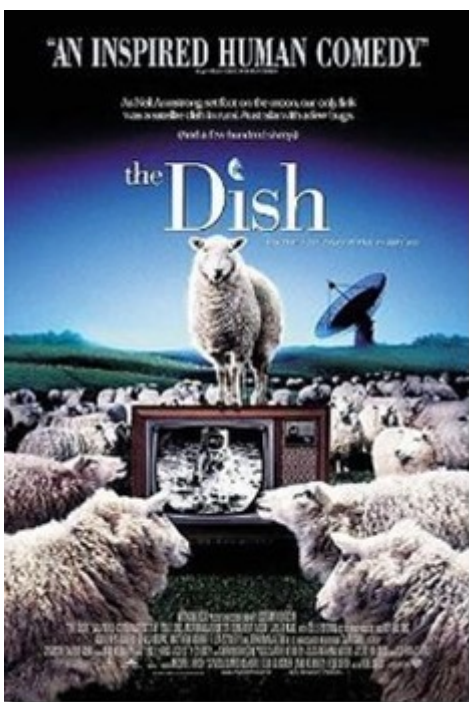
permis la détection du satellite Spoutnik envoyé par l'URSS la même année que sa mise en route puis celle de la mission Luna 15. Il servit à récupérer les images de la lune captées par la sonde Luna 9 en 1966. Il a participé à une expérience d'interférométrie avec un autre radiotélescope dans les années 1960. Il contribua à la découverte du quasar 3C 273 en 1963. Il fut modernisé en 1972. Il couvre les fréquences de 610 MHz à 5 GHz, étant équipé de têtes de 1,4, 1,8 et 5 GHz refroidies à 15K (K = Kelvin, échelle de température qui démarre au zéro absolu autour de -273°C). Il contribua en 1998 au projet Phoenix de recherche de vie extraterrestre du SETI, ce qui lui permis d'observer de près 820 étoiles de caractéristiques voisines du Soleil et à moins de 200 années lumière. La surface de son antenne a été entièrement refaite en 1974. Le télescope participe au programme d'interférométrie MERLIN associant deux puis, progressivement, six radiotélescopes du Royaume-Uni depuis les années 1970 et 1980. Il est aussi intégré au programme d'interférométrie VLBI qui sera évoqué plus tard.



Parkes (Australie, 1961) a une antenne de 64 m. Sa base en forme de moulin est des plus vintage. Il dépend du CSIRO, le Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation qui est l'organisme de recherche spatiale australien. Son site a été choisi car il est isolé et dénué d'interférences radio. A ses débuts, il permis la communication avec la sonde d'exploration spatiale Mariner 2 en 1962 dans la bande de 960 MHz. En 1969, il servi à récupérer les images TV en direct du premier pas sur la lune de Buzz Aldrin, qui étaient de meilleure qualité que celles que récupéraient les antennes du site américain de Goldstone. Il servit aussi au tracking de l'arrivée sur Mars de Curiosity en août 2012. Mais ces missions liées à la NASA ne correspondent qu'à une toute petite partie de l'activité de ce radiotélescope qui est surtout consacré à l'étude des galaxies, notamment au niveau de l'hydrogène (bande de 21 cm) ainsi qu'à l'étude de quasars. Son antenne a été modernisée plusieurs fois, la dernière en 2003, intégrant des panneaux métalliques plats au lieu d'une structure en treillis métallique.



Ce radiotélescope est une “star” du film “The Dish” sorti en 2000 et qui raconte son rôle lors de la mission Apollo 11 [bande annonce]. L’antenne que l’on est voit est celle de 2000 avec son revêtement métallique. Elle n’a pas été reconstituée dans son état de 1969 qui n’en avait pas, un détail que les non experts ne peuvent pas remarquer, comme on en trouve dans tout un tas de films.



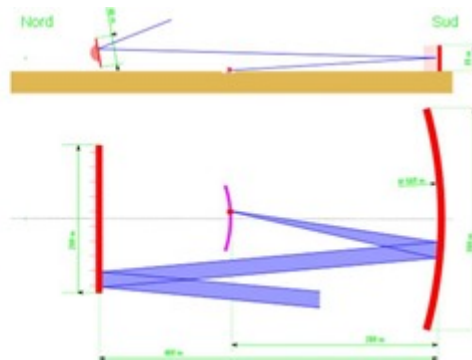
Large Transit Telescope (USA, 1962) avait une antenne de 90 m et pesant 500 tonnes. Elle s’est effondrée sur elle-même en 1988, du fait d’un défaut de structure. Ce n’était pas lié aux intempéries. Heureusement, le télescope avait déjà atteint sa limite d’âge à l’époque. C’était donc une entreprise de démolition efficace même si involontaire.



Arecibo (USA/Porto Rico, 1962) avec une antenne fixe qui permet d'observer le ciel soit en profitant de la rotation de la terre soit en utilisant le réflecteur mobile qui donne une latitude d'observation de $\pm 20^\circ$. A cet effet, l'antenne d'Arecibo n'est pas parabolique mais sphérique. Elle focalise les rayons non pas sur un point mais sur un plan horizontal. Et sa forme se rapproche de celle d'une parabole en son centre. Les rayons sont ensuite convergés via un réflecteur secondaire puis tertiaire situés dans une coiffe sphérique suspendue par trois fils. Le télescope peut ainsi suivre une source radio donnée pendant 2 à 3 heures. Le récepteur est constitué de 7 bolomètres couvrant différentes bandes de fréquences. C'était le grand radiotélescope circulaire au monde jusqu'à l'arrivée du FAST chinois en 2016. Il est notamment dédié à l'observation des galaxies, quasars, pulsars mais aussi de planètes du système solaire et d'astéroïdes. Côté programmes d'observations : des analyses de galaxies, de champs magnétiques, et, de concert avec d'autres instruments, des études de pulsars, d'ondes gravitationnelles, et d'interférométries.



Radio télescope de Nançay (France, 1965) et son antenne principale verticale qui fait 7000 m². Il s'appuie sur un grand réflecteur orientable. Installé en Sologne, il capte les ondes radio entre 10 m et 3 cm (10 GHz à 30 MHz). Il est toujours opérationnel (source photo).



Effelsberg (Allemagne, 1972) et son antenne de 100 m, construite entre 1967 et 1971. Elle lui permet d'atteindre une résolution angulaire de 33 secondes d'arc, double de celle de l'œil humain pour les longueurs d'ondes de 1,3 cm. Il pèse 3200 tonnes. L'antenne tourne horizontalement à 360° et verticalement à 90°, permettant une observation complète du ciel. Il couvre les longueurs d'onde allant de 3 mm à 1 m (90 GHz à 300 MHz) avec un système à 7 bolomètres calé sur 21 cm et des bolomètres allant de 7 mm à 11 cm. La construction de l'antenne tenait compte des déformations différentes entre les positions verticale et horizontale pour qu'elle conserve une forme parabolique. La focale changeait juste de 10 cm, nécessitant un ajustement dynamique de la position du bloc de récepteurs. Le radiotélescope a été plusieurs fois upgradé entre 1981 et 2010. Son miroir secondaire appelé sous-réflecteur a été remplacé en 2006 par un système de surfaces actives avec 96 segments et autant de systèmes de contrôle de position. Il est toujours opérationnel et continue

d'évoluer.



Nobeyama (Japon, 1982) est un radiotélescope opérant dans les ondes millimétriques et doté d'une antenne de 45 m, installé au Nord-Ouest du Mont Fuji. Faible longueur d'onde oblige, sa surface est très précise, à 0,1 mm près. Il couvre les ondes de 2,6 mm à 1,5 cm couvertes par 9 récepteurs (qui sont en train de passer à 5 qui sont plus performants). Il a permis la découverte de nombreuses molécules dans l'Univers dont des précurseurs de la glycine, un l'acide aminé, ainsi que de la vapeur d'eau autour du trou noir au centre de la Voie Lactée. Il est toujours opérationnel.



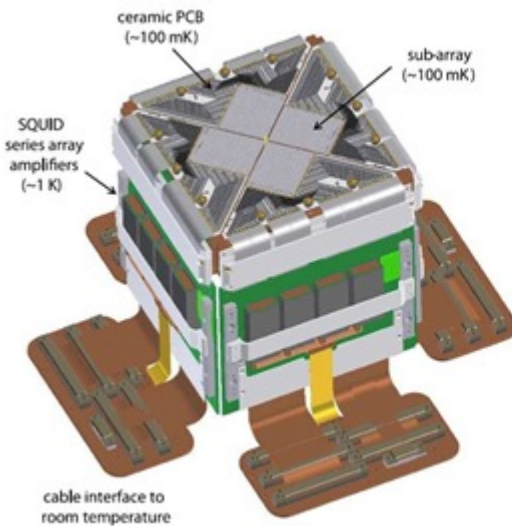
IRAM 30 meter telescope (Espagne, 1984) est un radiotélescope de l'IRAM français (Institut de Radioastronomie Millimétrique). Avec son antenne de 30 m, c'était au moment de son lancement le plus grand télescope captant les ondes millimétriques entre 0,8 et 3 mm. Il est complémentaire du JCLMT lancé peu de temps après (ci-dessous). Sa surface est précise à 55 microns près et son pointage l'est à 1 arcsec près. Il est doté d'une série de récepteurs à pixel unique opérant à 3, 2, 1 et 0,8 millimètres et de deux caméras à 1 millimètre : HERA avec 9 pixels, afin de cartographier le gaz moléculaire dans des nébuleuses étendues, et MAMBO, une caméra de 117 pixels, développée à l'institut de radioastronomie Max-Planck en Allemagne, servant à observer l'émission de la poussière des nuages moléculaires proches aux galaxies les plus lointaines.



James Clerk Maxwell Telescope (USA, 1987) est un radiotélescope dédié à la captation des ondes sub-millimétriques, situées juste après l'infrarouge dans le spectre électromagnétique. La réception de ces ondes est gênée par l'atmosphère terrestre. Mais elle est possible en altitude dans des lieux où l'atmosphère est très sèche. C'est pourquoi ce radiotélescope est installé sur l'observatoire de Mauna Kea à Hawaï à 4092 m d'altitude, à proximité de nombreux télescopes optiques comme le CFHT Franco-Canadien ou le Keck américain. Son miroir primaire fait 15 m. C'est le plus grand radiotélescope observant les ondes de cette catégorie. Il est utilisé pour étudier le système solaire, la poussière et les gaz interstellaires et les galaxies distantes. Il était financé initialement et jusqu'en 2015 par le Royaume Uni, le Canada et les Pays-Bas. En 2015, il est passé sous le contrôle de l'East Asian Observatory, une association à but non lucratif d'Hawaï.



Au milieu des années 2000, ce radiotélescope a été équipé d'un nouvel instrument, le SCUBA-2, doté d'un bolomètre matriciel de 10 000 pixels à base de quatre matrices et permettant de scanner le ciel très rapidement dans les bandes sub-millimétriques (source du schéma ci-dessous du SCUBA-2). Il est refroidit à 100mK, soit 0,1°C au-dessus du zéro absolu !



le bolomètre du SCUBA2 du JCMT
quatre matrices de bolomètres
refroidies à 100 mK
longueurs d'onde de 450 et 850 microns
(submillimétriques)

source: *SCUBA-2: The 10000 pixel
bolometer camera on the
James Clerk Maxwell Telescope*

D'un point de vue de la construction, c'est l'un des rares grands radiotélescopes qui soit entièrement caréné, comme le Caltech Submillimeter Telescope de Mauna Kea à Hawaï qui est doté d'une antenne de 10,4 m et le Heinrich Hertz Telescope en Arizona avec son antenne de 10 m.

Green Bank Telescope (USA, 2000) est le plus grand télescope orientable du monde avec son antenne de 100 m qui a remplacé le Large Transit Telescope qui s'était effondré sur lui-même en 1988. Il a mis 9 ans à être construit ! Il est installé en Virginie occidentale. Son antenne est constituée de 2004 surfaces indépendantes dont la position est ajustée par 2209 vérins mettant en œuvre la version radio de l'optique adaptative. Ses récepteurs lui permettent de capter les ondes radio sur un spectre large allant de 320 MHz à 100 GHz. Il permet aussi de faire de la spectroscopie entre 67 et 93 GHz. 15% de son temps d'observation est consacré à l'interférométrie multi-télescopes dans le cadre du VLBI (voir plus loin). Doté d'une dizaine de récepteurs bolométriques, il couvre un large champ de longueurs d'ondes allant de 4 mm à 1 m. Parmi ses nombreuses applications, ce radiotélescope sert à la détection de mégamasers, des galaxies qui émettent des micro-ondes directives comme un laser et à très forte puissance.

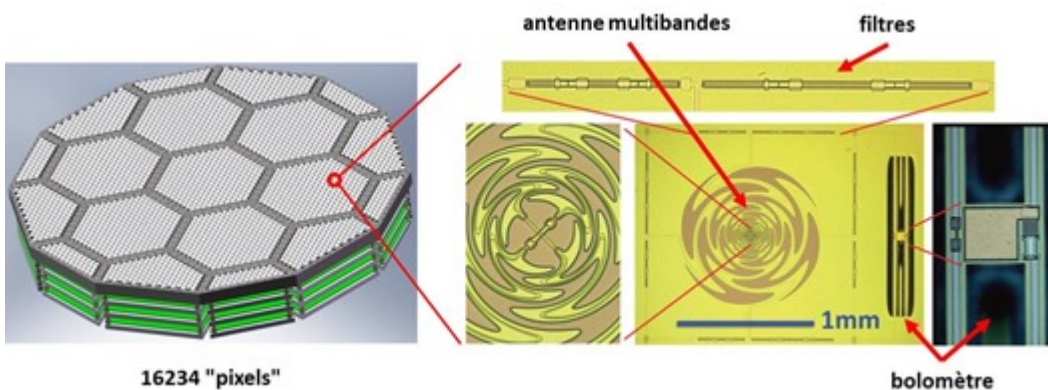


South Pole Telescope (Pôle Sud, 2007) est un radiotélescope de 10 m couvrant les ondes sous-millimétriques, millimétriques et micro-ondes. Il est situé à 2800 m d'altitude dans la base scientifique américaine Amundsen-Scott de dans l'Antarctique qui est pile-poil au Pôle Sud ! Il y bénéficie d'un air très froid (jusqu'à -70°C) et par conséquent, peu humide, ce qui évite l'absorption par l'atmosphère des ondes radio captées. Les nuits sont plutôt longues car elles durent six mois. Mais le jour de six mois permet aussi de faire des observations, le Soleil étant très bas à l'horizon. La zone n'est accessible que par avion de transport C-130. Le miroir principal de 10 m est utilisé sur un diamètre de 8 m. Sa précision est de 20 microns (0,02 mm). Le miroir secondaire du

télescope est refroidi à 10K (-263°C) et l'instrument de capture à seulement 250mK (0,25°C au-dessus du zéro absolu). C'est un télescope à large champs de vue, de un degré [source].



Sa caméra a déjà bénéficié de deux mises à jour. La première version (SPT-SZ) faisait 960 pixels, la seconde (SPT-pol) faisait 1600 pixels et la dernière (SPT-3G, déployée en 2017) comprend 16 234 bolomètres couvrant chacun les ondes millimétriques 1,4, 2 et 3 mm et fait aussi office de polarimètre. Le système de capture fait 44 cm de large. Chaque pixel comprend une antenne tribandes couplée à deux filtres qui alimentent six bolomètres, un par bande x les deux polarités, le tout recouvert par une lentille hémisphérique. Cela lui donne une excellente résolution angulaire de 1 à 1,6 arcminutes selon la longueur d'onde observée [source].



Le South Pole Telescope est notamment dédié à l'analyse du fond diffus cosmologique (CMB en anglais pour Cosmic Microwave Background) ainsi que des clusters de galaxies et de l'évolution des galaxies les plus anciennes de l'Univers. Son analyse du CMB est maintenant plus précise que celle qui est générée par le satellite d'observation Planck lancé en 2009. Il permet de remonter très tôt dans l'histoire de l'Univers, à seulement 380 000 années depuis le big bang.

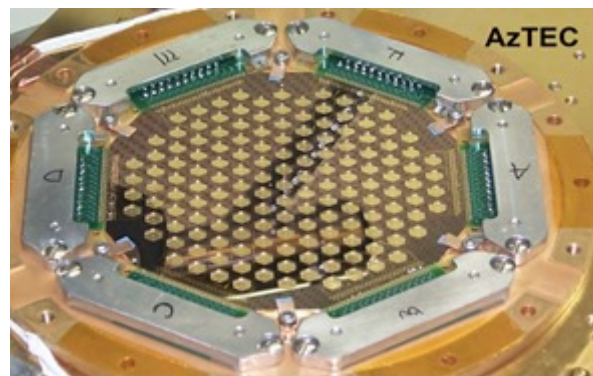
A noter qu'il existe deux autres télescopes du même type, mais avec une antenne moins grande : le Atacama Cosmology Telescope (6 m) ainsi que Huan Tran Telescope (2,5 m) qui est également installé dans le désert d'Atacama au Chili.

Sardinia Radio Telescope (Italie – Sardaigne, 2011) est un grand radiotélescope opérant dans les ondes allant de 3 mm à 1 m avec une grande antenne de 64 m, dont 50 utiles, ajustée par 1116 vérins, et un réflecteur géant de 7,9 mètres. L'instrumentation comprend l'imagerie, la spectrographie et la polarimétrie. L'imagerie s'appuie

sur une matrice hexagonale de 144 bolomètres (AzTEC), quatre bolomètres millimétriques (SPEED) et une matrice de récepteurs hétérodynes ajustable entre 2,5 et 3,7 mm de longueur d'ondes (SEQUOIA). Le site retenu en Sardaigne présente la particularité d'être l'un de ceux qui reçoit le moins de précipitations pluvieuses de toute l'Italie avec le sud de la Sicile. Ce radiotélescope des pulsars dans le centre de la Voie Lactée, des galaxies éloignées ("high z") ainsi que de l'eau et de l'ammoniaque.



Large Millimeter Telescope (Mexique, 2011) est situé à 4850 m d'altitude et doté d'une antenne active de 50 m et de positionnement précis à 50 microns près grâce à un système de positionnement holographique à micro-ondes s'appuyant sur des satellites géostationnaires (je n'ai pas encore trouvé comment cela fonctionnait...). Il a de quoi couvrir les ondes millimétriques allant de 0,8 à 4 mm. C'est le plus grand télescope à ondes millimétriques à ce jour. Sa résolution n'est cependant pas extraordinaire, son principal bolomètre captant "seulement" 144 pixels (*ci-dessous*). Il est par contre très précis et sensible grâce à la taille de l'antenne. Ceci compense cela.



Shanghai Tian Ma (Chine, 2012) et son antenne de 65 m. La construction a duré seulement deux ans. Pesant 2700 tonnes, il couvre les longueurs d'onde allant de 7 mm à 21 cm, étendue ensuite aux bandes Ku et Ka (1 m). Comme il est tout récent, son antenne est tout logiquement active. Comme tous les télescopes associés à des réseaux d'interférométrie internationaux, il est doté d'une horloge atomique. Il contribue notamment aux recherches de pulsars.

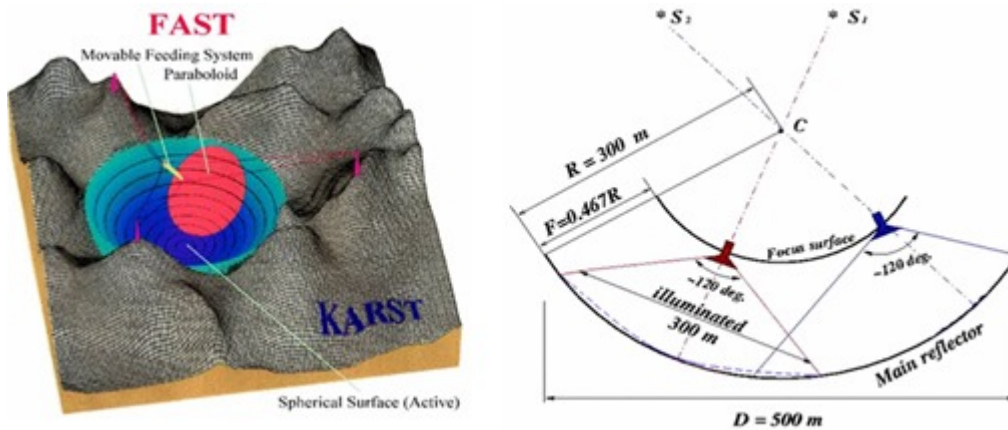


FAST (Chine, 2016) est le plus grand télescope mondial construit d'un seul tenant, quelle que soit la technologie utilisée. Alors que la Chine n'est pas dans le peloton de tête des télescopes optiques ! Son antenne fait 500 m de diamètre ! Le cercle blanc ci-dessous indique la taille de l'antenne d'Arecibo en comparaison. Le projet a beau avoir l'air d'être pharaonique en taille, il ne représente qu'un investissement de \$180m ce qui est sommes toutes modeste au regard de nombreux autres projets, et notamment ceux des **télescopes géants** à plus d'un milliard d'Euros. La partie "travaux publics" d'un tel projet coute relativement moins cher que l'optique et les instruments d'un télescope classique. Et le télescope n'est pas installé en altitude comme les sont les télescopes géants.



L'antenne est constituée de 38 778 panneaux d'aluminium perforés triangulaires de 1 par 2 m qui sont contrôlables individuellement par vérins. Avant sa mise en service, près de 10 000 personnes résidant dans un rayon de cinq kilomètres autour du radiotélescope ont été déplacées pour créer une zone blanche sans nuisance électromagnétique d'origine humaine. Une méthode qui n'est pas sans rappeler celle de la construction du barrage des Trois-Gorges !

La forme de l'antenne est sphérique comme celle d'Arecibo, mais les miroirs sont mobiles contrairement à ceux de ce dernier. Ils permettent de créer dynamiquement une forme parabolique de 300 m qui se déplace dans l'antenne de 500 m (*ci-dessous*).



Le récepteur aérien bénéficie alors de rayons bien concentrés. Les fréquences d'observation vont de 70 MHz à 3 GHz. La cabine de réception contient 9 récepteurs dont un qui est dédié à la bande de l'hydrogène (1,23–1,53 GHz, autour du 1,4 GHz, permettant de détecter du redshift de sources éloignées) et comprend 19 bolomètres. C'est du très gros ouvrage !

Les objectifs du FAST sont d'observer à grande échelle les nuages interstellaires et gaz dans les galaxies et les pulsars. Il est au passage l'un des nouveaux composants du réseau géant d'interférométrie VLBI que nous évoquerons plus tard.

L'article suivant portera justement sur l'examen de ces **interféromètres** qui utilisent plusieurs antennes fixes ou orientables pour améliorer la résolution angulaire des images générées dans les ondes radio.

Voici les pointeurs sur les douze épisodes de cette série dans leur ordre de parution :

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : l'Univers

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes terrestres

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : grands télescopes

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes géants

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : radiotélescopes

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : interféromètres

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes spatiaux

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes spatiaux dans le visible

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes spatiaux dans l'infrarouge

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : télescopes spatiaux dans les rayons gamma, X et UV et ondes radio

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : les exoplanètes

De l'astronomie à l'entrepreneuriat : entrepreneurs

Cet article a été publié le 11 juillet 2017 et édité en PDF le 16 mars 2024.
(cc) Olivier Ezratty – "Opinions Libres" – <https://www.oezratty.net>