

# LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 163 - Septembre 2018 9 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



Numéro 163 - automne 2018



ISSN 0758-234X

## Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.

Le **CLEA** organise des stages nationaux (Écoles d'Été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.

L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement...), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.

Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés.

### Présidents d'honneur :

Jean-Claude Pecker  
Lucienne Gouguenheim  
Georges Paturel

### Bureau du CLEA pour 2018

**Présidente** : Cécile Ferrari  
**Trésorière** : Sylvie Thiault  
**Trésorière adjointe** : Chantal Lecoutre  
**Secrétaire** : Danièle Imbault  
**Secrétaire adjoint** : Jean-Luc Fouquet

### Responsables des groupes

**Vie associative** : Jean-Michel Vienney  
**Cahiers Clairaut** : Christian Larcher  
**Productions Pédagogiques** : Pierre Causeret  
**Communication** : Charles-Henri Eyraud  
**École d'Été d'Astronomie** : Danièle Imbault  
**Responsables du site** :  
Francis Berthomieu et Charles-Henri Eyraud



Merci à celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce numéro des Cahiers Clairaut, nous citerons :

Francis Berthomieu, Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Agnès Cousin, Philippe Drompt, Olivier Gayraud, Julien Girard, Léo Hauser, François Hurter, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Isabelle Osterstock-Tournaire, Frédéric Pitout, Jean-Louis Rault, Jean Ripert, Marion Thomas, Isabelle Vauglin, Jean-Michel Vienney.

Les auteurs recevront plusieurs numéros 163 afin de faire connaître la revue autour d'eux.

Une des antennes de NOEMA dans les Hautes-Alpes sur le plateau de Bure à 2 550 m d'altitude. (Photo JM Vienney prise pendant l'école d'été du CLEA en 2016).

Cette antenne de 15 m de diamètre fait partie d'un ensemble qui en comptera bientôt 12, fonctionnant en interférométrie dans le domaine des ondes radio millimétriques. Les antennes sont montées sur rail, ce qui permet de modifier leur écartement.

NOEMA s'intéresse en particulier à la formation des premières galaxies dans l'Univers, aux trous noirs super massifs au centre des galaxies, à la dynamique et à l'évolution chimique des galaxies proches, à la détection de molécules organiques complexes et aux différentes étapes de la formation des étoiles.

# Les Cahiers Clairaut

Automne 2018

## Éditorial

D'après le Muséum National d'Histoire Naturelle, chaque année 20 000 tonnes de matière météoritique entrent dans l'atmosphère terrestre. Ces pierres qui tombent du ciel sont une source précieuse d'informations sur le Système solaire. Pour espérer les retrouver après leur chute et les recueillir, il importe de déterminer très tôt leur trajectoire dans l'atmosphère. Heureusement le dispositif FRIPON apporte désormais une aide efficace. Il s'agit d'un réseau composé d'une centaine de caméras grand-angle (fish-eye) réparties sur l'ensemble du territoire. Ces caméras enregistrent tous les objets qui se déplacent à plus de 7 km/s. Certaines caméras sont couplées avec des récepteurs radio permettant d'enregistrer les échos des radars sur le plasma généré par les météoroïdes<sup>1</sup>. À partir de ces enregistrements on peut déterminer la vitesse absolue des météoroïdes par effet Doppler-Fizeau. Le thème de ce numéro est consacré à la radioastronomie.

En dehors du thème vous trouverez deux activités réalisables avec « nos élèves » :

Une manip astucieuse dont l'objectif est de déterminer la nature d'un objet céleste non identifié à l'avance, par comparaison entre deux clichés photographiques, puis d'en déduire sa distance au sol.

Un autre projet géré par des élèves permet une étude de l'atmosphère jusqu'à 35 000 mètres à l'aide d'un ballon-sonde supportant une batterie d'appareils de mesures.

Un des articles de fond porte sur les résultats transmis par la sonde *Curiosity*, « premier géologue » de la surface de Mars, dont l'objectif est de mettre en évidence l'éventuelle habitabilité passée de la planète. L'autre est la deuxième partie de l'article sur la base Concordia (située à 3 233 m d'altitude dans l'Antarctique) où les conditions atmosphériques d'observation sont exceptionnelles.

**Christian Larcher pour l'équipe**

<sup>1</sup> Météoroïde = petit corps du Système solaire provenant de la désagrégation partielle d'un astéroïde ou d'un noyau cométaire.

## Sommaire

### Article de fond

#### **Curiosity sur Mars**

Agnès Cousin

p 2

### Avec nos élèves

#### **Quel est cet indésirable ?**

Olivier Gayraud

p 6

### Thème : radioastronomie

p 9

#### Article de fond

##### **Radioastronomie, notions de base**

Pierre Causeret, Jean-Michel Vienney

p 10

#### Astrophysique

##### **Panorama de la radioastronomie moderne**

Julien Girard

p 13

#### Avec nos élèves

##### **Des radiotélescopes pour l'éducation**

Frédéric Pitout

p 19

#### Astronomie amateur

##### **FRIPON et Vigie-Ciel**

Jean-Louis Rault

p 22

#### Astrophysique

##### **L'observatoire d'Arecibo**

Frédéric Pitout

p 26

### Observation

#### **Ciel de l'automne 2018**

Pierre Causeret

p 28

### Avec nos élèves

#### **Aux portes de l'espace**

Léo Hauser et al.

p 29

### Mots croisés radioastronomie

p 33

### Article de fond

#### **Concordia - Dôme C (2<sup>e</sup> partie)**

Isabelle Vauglin

p 34

### Solutions des mots croisés

p 37

### Vie associative

#### **L'école d'été du CLEA 2018**

Marion Thomas, Isabelle Osterstock-Tournaire

p 38

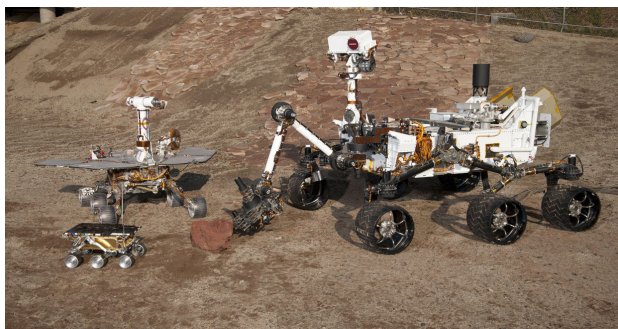
## Curiosity sur Mars, six ans d'exploration avec l'instrument ChemCam au sein du cratère Gale

Agnès Cousin IRAP Toulouse, Agnes.cousin@irap.omp.eu

*Le rover Curiosity, « premier géologue » à la surface de Mars, a pour objectif de mettre en évidence l'habitabilité passée de la planète. Il est bardé d'instruments scientifiques dont la caméra ChemCam qui permet d'analyser à distance par spectroscopie la nature et la composition des roches à l'aide d'un faisceau laser. L'IRAP à Toulouse a mis au point la partie optique de l'instrument.*

Mars est fascinante ! Observable à l'œil nu, sa teinte rougeâtre l'associe au dieu de la guerre ; son mouvement rétrograde intrigue les premiers astronomes ; l'observation d'étranges chenaux à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle lance le mythe des Martiens. Oxyde de fer, mouvements conjugués de la Terre et de Mars, rivières asséchées, l'époque moderne détruit les mythes et construit la science de demain...

En un demi-siècle, plus de 20 missions spatiales ont étudié Mars in situ. En ce moment, cinq orbiteurs (NASA, ESA et Inde) cartographient sa surface que deux rovers (NASA) sillonnent. De ces données, les scientifiques dévoilent une planète ordinaire au destin extraordinaire. Figée dans le temps depuis 3 milliards d'années, Mars a conservé la mémoire d'une époque qui vit sur Terre la transition d'un astre naissant chaud à une planète vivante. De tels processus ont-ils existé sur Mars ? Sont-ils universels ? L'étude de Mars nous permet de comprendre comment une planète devient habitable, voire habitée.

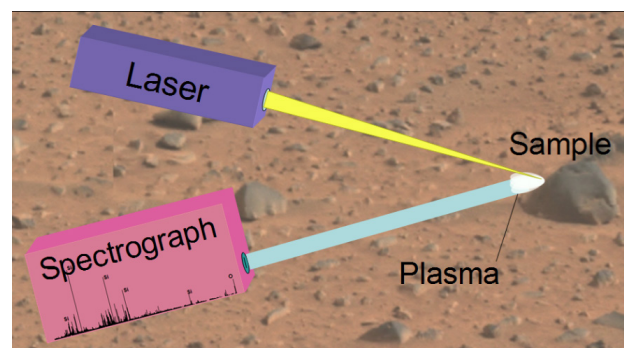


**Fig.1.** Photo des trois dernières générations des rovers martiens. Ces rovers sont les modèles expérimentaux. De gauche à droite : le rover le plus petit correspond à Sojourner (mission « Mars Pathfinder », atterri en 1997), puis un des rovers jumeaux Spirit et Opportunity de la mission « Mars Exploration Rovers » (atterris en 2004). À droite, le rover dernière génération, Curiosity (atterri en 2012). Crédits : NASA/JPL-Caltech.

En 2004, la NASA a lancé un appel d'offre pour équiper son nouveau robot martien, un monstre de

900 kg de la taille d'une voiture (figure 1), de 80 kg d'instruments scientifiques – ce qui représente plus de 10 fois la charge utile embarquée sur les robots précédents. *Curiosity* devient le « premier géologue » à la surface de Mars, dont l'objectif scientifique est de mettre en évidence l'habitabilité passée de la planète, à travers quatre axes principaux : (a) étudier le potentiel biologique, (b) caractériser la géologie et la géochimie du lieu, (c) investiguer le rôle de l'eau, (d) caractériser les radiations à la surface de la planète.

L'équipe de Toulouse à l'IRAP, en collaboration avec le LANL au Nouveau-Mexique, est sélectionnée en 2005 pour la construction de l'instrument original, ChemCam, qu'ils ont conçu ensemble. Son rôle : mesurer à distance la composition des roches et des sols. ChemCam utilise un laser de puissance pour vaporiser à distance des cibles martiennes, créant un plasma qui est analysé par spectroscopie optique – c'est ce qui est appelé la technique de spectroscopie induite par laser (figure 2).

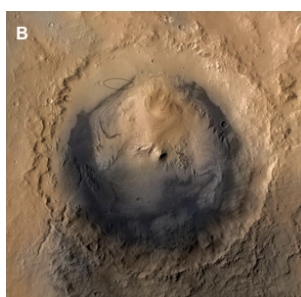
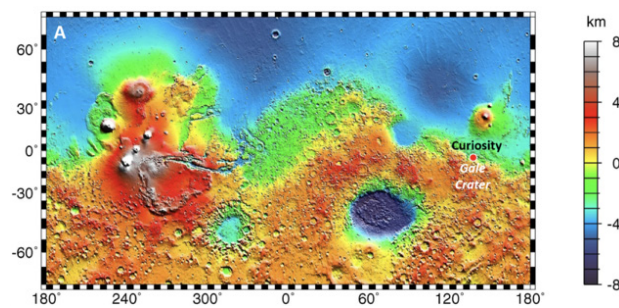


**Fig.2.** Ce schéma illustre la technique de spectroscopie induite par laser (appelée LIBS en anglais pour « Laser Induced Breakdown Spectroscopy »). La focalisation d'un laser à forte puissance sur une cible va créer un plasma. La lumière du plasma peut ensuite être analysée par spectroscopie afin de connaître les espèces chimiques présentes dans la cible. Crédits : NASA/JPL-Caltech.

De cette analyse submillimétrique (entre 300 et 500 microns), les scientifiques en déduisent la composition

chimique de Mars à une distance allant de 2 à 7 m du robot. ChemCam est également équipé d'une micro-caméra (RMI – « Remote Micro Imager ») qui permet d'étudier la morphologie et la texture des cibles visées.

Le site d'atterrissage choisi pour *Curiosity* est le cratère de Gale, qui est un bassin d'impact d'environ 150 km de diamètre. Celui-ci s'est formé il y a environ 3,8 Ga (milliards d'années) à l'interface entre les hauts terrains cratérisés de l'hémisphère sud et les plaines de l'hémisphère nord. Le cratère présente un mont central haut de 5 km riche en sédiments, appelé « Aeolis Mons » ou encore Mont Sharp. Les données infra-rouges acquises depuis l'orbite ont montré que ces terrains sédimentaires étaient enrichis en minéraux formés en présence d'eau. Les dépôts les plus anciens, situés à la base du Mont Sharp sont datés d'environ 3,6-3,8 Ga. Ils contiennent des phyllosilicates, qui sont des minéraux secondaires formés lors d'une altération aqueuse. En remontant la stratigraphie vers le sommet, on observe une transition entre les phyllosilicates et les sulfates, ces derniers se formant dans des environnements plus appauvris en eau. Les terrains les plus anciens présentant une variété de minéraux secondaires pourraient alors avoir préservé les environnements aqueux passés, et donc de possibles marqueurs organiques. De plus, les changements minéralogiques observés en fonction de la stratigraphie indiquent que l'environnement a évolué avec le temps, possiblement lié à une variation climatique.

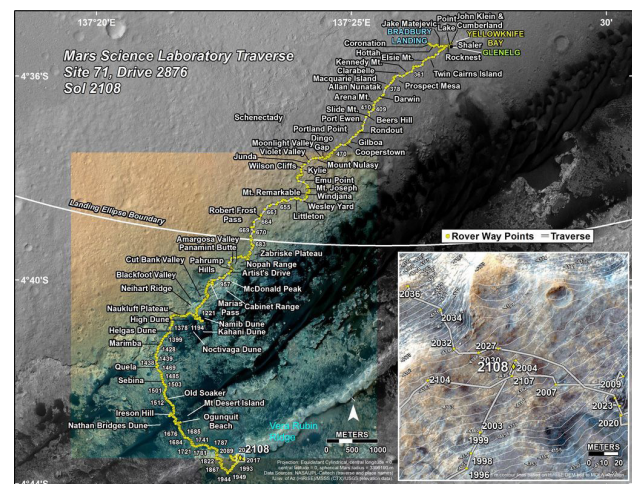


**Fig.3.** A. Localisation du cratère Gale sur la carte MOLA (« Mars Orbital Laser Altimeter ») - crédits image : NASA/JPL/GSFC); B. Mosaique HiRISE du cratère Gale avec l'ellipse d'atterrissage en noir dans les plaines du Nord-Ouest (crédits, NASA/JPL-Caltech/ESA/DLR/FU Berlin/MSSS).

L'atterrissage de *Curiosity* fut un réel succès malgré l'incroyable challenge technique, le 6 août 2012 (figure 3). Depuis plus de 6 ans, nous sommes aux

commandes de ChemCam qui travaille dur tous les jours. L'objectif du rover est de gravir le Mont Sharp mais la route est longue, avec une succession de sites géologiques particulièrement intéressants à analyser.

Le site d'atterrissage a été baptisé « Bradbury Rise ». Cette plaine, proche d'un cône alluvial, expose à sa surface quelques roches magmatiques ainsi que des conglomérats qui ont été transportés. Les roches magmatiques, observées principalement au début de sa progression (figure 4), ont montré une diversité inattendue : certaines sont de types basaltiques comme précédemment observées par les missions MER (« Mars Exploration Rovers »), alors que d'autres sont très enrichies en silice et en alcalins (composition felsique), présentant même des phénocristaux de plagioclases (figure 5).

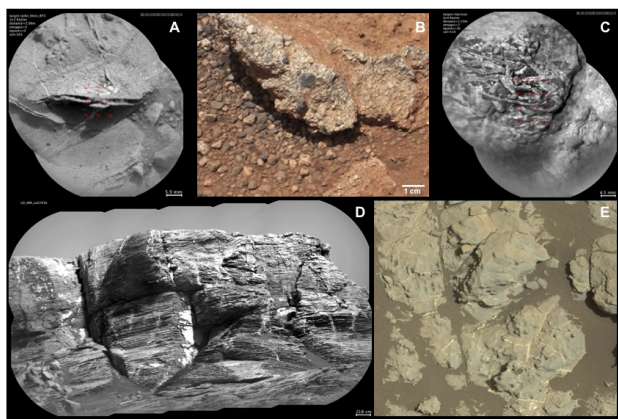


**Fig.4.** Trajectoire réalisée par *Curiosity* jusqu'au sol 2108 (13 juillet 2018), avec les principales étapes – crédits : NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona.

Certains contiennent du fluor, élément observé pour la première fois sur Mars. Ces résultats surprenants ont mis en évidence un magmatisme martien bien plus complexe qu'on ne se l'imaginait. Les conglomérats (figure 5), d'après la texture et la morphologie des clastes qui les forment, ont été transportés par des rivières. Ceux-ci viennent des flancs du cratère et représentent donc la croûte ancienne de la planète.

Peu de temps après l'atterrissage, *Curiosity* s'est déplacé vers l'Est pour étudier un site appelé « Yellowknife Bay » (figure 4), riche en dépôts sédimentaires variés (argilites et grès). Le rover a d'ailleurs réalisé son premier forage à « Sheepbed », zone riche en argilite, et qui correspond à un ancien lac.

Non loin de là, le rover est allé étudier un site appelé « Shaler », correspondant à des grès fins, roches nécessitant une fois de plus la présence d'eau pour se former. Ces roches sédimentaires semblent dériver



**Fig.5.** Images de différentes cibles analysées au long du parcours. A/ Image RMI de la cible « John Klein RP3 », correspondant à un « Raised Ridge » observé à Yellowknife Bay; B/ Image MastCam d'un conglomérat observé dans les plaines de Bradbury, proche du site d'atterrissage ; C/ Image RMI de la cible « Harrison », roche magmatique effusive présentant des phénocristaux de plagioclase ; D/ Panorama d'images RMI de la transition vers Vera Rubin Ridge, où les laminations des argilites sont clairement visibles, ainsi que les veines de sulfates de calcium ; E/ Image MastCam de la cible « Funzie », correspondant à une argillite où les laminations sont également présentes, ainsi que les veines de sulfate de calcium.

Crédits pour les images RMI : NASA/JPL Caltech/CNES/CNRS/LANL/IRAP/IAS/LPGN ; crédits pour les images MastCam : NASA/JPL-Caltech/MSSS.

de sources basaltiques et apparaissent principalement non altérées, avec cependant les traces de divers processus diagénétiques, comme des veines de sulfates de calcium ou encore des « raise ridges » enrichies en magnésium (figure 5).

Les formations sédimentaires de « Cooperstown » (figure 4) représentent des dépôts de plusieurs mètres d'épaisseur à faciès variés, allant du grès à grain fin au conglomérat, et correspondant à un système de deltas. Les deltas se forment lorsqu'un cours d'eau se jette dans une grande étendue d'eau telle qu'un lac (mais aussi l'océan ou la mer), où les alluvions charriées se déposent. L'orientation de ces dépôts montre que le cours d'eau s'écoulait du nord vers le sud, et donc probablement depuis les bords du cratère. Ces formations sont particulièrement intéressantes car elles présentent un enrichissement en potassium cinq fois plus élevé que la croûte moyenne martienne. Cet enrichissement semble lié à la présence de minéraux tels que des feldspaths potassiques ou encore des phyllosilicates de type illite. Ces minéraux semblent être dérivés de divers types de roches ayant été charriées par le cours d'eau.

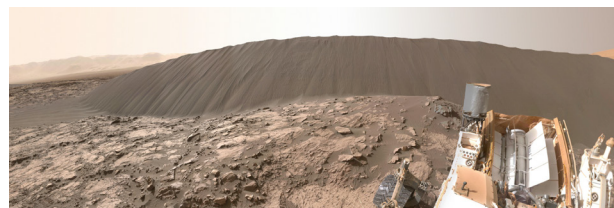
*Curiosity* a atteint la base du Mont Sharp en septembre 2014 (au sol 801 - un sol correspondant à un jour sur Mars), en arrivant au site appelé « Pahrump Hills » (figure 4), appartenant à la « Murray Formation », que *Curiosity* continue d'étudier actuellement. Les

dépôts rencontrés à « Pahrump Hills » représentent des argilites en fines couches plus ou moins épaisses, représentant un environnement de lac plus ou moins profond. L'observation de « mudcracks », fissures de dessiccation, suggère que les dépôts autour du lac se sont asséchés. De nombreuses structures diagénétiques sont également observées, telles que des nodules dendritiques ou encore des veines de sulfate de calcium.

Tout au long du parcours différents types de formations diagénétiques ont pu être observés et analysés. Les veines de sulfate de calcium (figure 5) sont les plus courantes et montrent différentes textures. Certains nodules, assez sombres, ont révélé la présence de sulfate de magnésium, alors que d'autres sont enrichis en fer, manganèse, et phosphore. Des dépôts de surface enrichis en manganèse ont aussi été découverts, révélant des conditions très oxydantes à l'époque de leur formation.

Les dépôts observés dans les plaines de Bradbury et tout au long de la formation Murray montrent que le cratère de Gale correspondait à un environnement fluvio-lacustre il y a environ 3,5 Ga, et qui a perduré dans le temps. Les cours d'eau s'écoulaient depuis les bords du cratère et se jetaient dans les lacs présents en son sein. Le changement d'environnement, devenant plus aride, a induit la formation de dépôts de sulfates autour de ces lacs. Des eaux souterraines ont interagi avec les dépôts sédimentaires (grès et argilites, dépôts fluvio-lacustres) durant leur lithification mais également après, ce qui suggère que l'eau liquide sur Mars a perduré en sub-surface après que l'environnement soit devenu plus aride.

En plus des dépôts fluvio-lacustres, *Curiosity* a étudié, proche du site d'atterrissage, un dépôt éolien fossile (inactif) appelé « Rocknest », où l'instrument CheMin (minéralogie) a fait sa première analyse. Ensuite, fin 2015 et mi-2016, *Curiosity* a réalisé deux campagnes d'analyse dans un champ de dunes encore actives (figure 6). C'est la première fois qu'un rover étudie des dunes actives *in situ* sur une autre planète, ce qui a permis non seulement d'étudier



**Fig.6.** Panorama MastCam de « Namib Dune », une des dunes étudiées par *Curiosity*. Cette dune fait environ 5 mètres de haut et se déplace d'environ un mètre par an. Sur cette image la base de la dune se situe à environ 7 mètres du mât du rover. Crédits : NASA/JPL-Caltech/MSSS.

leur chimie et leur minéralogie par rapport aux sols martiens, mais aussi de comprendre les dynamiques impliquées dans le déplacement de celles-ci.

ChemCam est le premier instrument à pouvoir analyser les sols à une échelle submillimétrique, permettant d'étudier à la fois les sols très fins (< 500 microns) et les grains plus grossiers qui sont souvent présents en surface. Les analyses effectuées de manière quasi-systématique ont permis de montrer que la composante fine des sols était relativement homogène avec une composition appauvrie en silicium, alors que les gros grains présentent plus de diversité. Certains d'entre eux proviennent de l'érosion des roches locales, alors que d'autres semblent provenir d'autres sources.

Actuellement, après plus de 2 100 sols à étudier la surface de Mars, *Curiosity* se situe sur un escarpement appelée « Vera Rubin Ridge » (VRR) en hommage à l'astronome éponyme. Cet escarpement, d'environ 6.6 km de long et environ 200 m de large (figure 4), semble appartenir à la « Murray Formation », malgré sa différence morphologique. VRR est constituée principalement d'argilites plus ou moins stratifiées (figure 5), correspondant donc toujours à un environnement lacustre. En plus de sa morphologie, VRR a la particularité de présenter une signature orbitale très enrichie en hématite (oxyde de fer). La présence d'hématite associée avec les dépôts sédimentaires suggère que ce relief abriterait un environnement passé différent de ceux étudiés par le rover jusqu'à présent, qui aurait pu

être habitable. Cependant, les observations faites par *Curiosity in situ* ont révélé que les roches analysées avaient une composition chimique proche de celles analysées au sein de la « Murray Formation ». Les enrichissements en fer, possiblement dus à la présence d'hématite, sont principalement observés dans les formations diagénétiques (nodules, veines). L'équipe scientifique est actuellement en train de planifier un forage, afin de mieux connaître la minéralogie complexe de cet escarpement. Les données minéralogiques des instruments CheMin et SAM aideront à mieux interpréter les différents processus de formation de ces oxydes de fer, ainsi que leur environnement de dépôt. La prochaine étape consiste à continuer la progression vers les dépôts enrichis en argile d'après les données orbitales (figure 7), où le rover se focalisera sur la recherche de marqueurs biologiques.

*Curiosity* a parcouru plus de 19 km en six ans, et a parcouru un dénivelé de près de 400 m depuis les plaines de Bradbury jusqu'aux flancs du Mont Sharp. L'instrument ChemCam est le premier à pouvoir analyser des cibles à distance. Il est donc largement utilisé par l'équipe scientifique, à raison d'une à deux heures en moyenne par jour. C'est pourquoi ChemCam a analysé plus de 2 400 cibles martiennes avec plusieurs centaines de tirs laser sur chacune d'entre elles, correspondant à plus de 570 000 spectres acquis.

■



*Fig. 7. Mosaïque du Mont Sharp réalisée par Curiosity, depuis le site de Vera Rubin Ridge. Au centre de l'image on aperçoit les dépôts enrichis en argile, que le rover devrait rencontrer très prochainement. Crédits : NASA/JPL-Caltech/MSSS.*

# AVEC NOS ÉLÈVES

## Quel est cet indésirable ?

Olivier Gayrard, Olivier.Gayrard@ac-toulouse.fr

*Un exemple de démarche d'investigation : à partir de l'étude de deux clichés d'une même portion de ciel nocturne une énigme apparaît. Avec un peu de réflexion et quelques calculs on peut en déduire un résultat intéressant.*

Voici deux photographies prises consécutivement. La première réalisée avec une monture équatoriale avec les moteurs de suivi enclenchés à la

vitesse sidérale. La seconde avec le suivi mis en pose. Que pouvons-nous déduire de ces deux clichés ?



*Fig.1.a.b. Dimanche 7 août 2016 01 h 15, 2 poses de 30 s consécutives avec un Canon EOS 60 Da au foyer d'un newton 8", f/3,9, iso 800. Haut, suivi sidéral, bas, suivi arrêté.*



## Où l'on cherchera la nature de l'objet, et par rapport à quoi il est en mouvement

Sur la première photographie, nous voyons la trace laissée par un objet non identifié. Il ne s'agit pas d'un avion, la marque étant continue, ni d'une étoile filante, la traînée étant trop petite pour le temps de pose. Nous pouvons faire l'hypothèse que cette empreinte est le témoignage du passage d'un satellite. Sur la seconde photographie, nous ne sommes pas surpris de voir les étoiles filer puisque le suivi de la monture est coupé. Deux informations apparaissent immédiatement : les sillons lumineux sont parallèles et de longueurs comparables pour un même temps de pose. Nous pouvons en déduire d'une part que le mouvement du supposé satellite par rapport aux étoiles est de même nature que le mouvement des étoiles par rapport à l'observateur (que l'on confondra avec la Terre) ; d'autre part que la vitesse angulaire de l'objet mystérieux par rapport aux étoiles a même valeur que la vitesse angulaire des étoiles par rapport à la Terre. Un examen plus attentif nous permet enfin d'extraire un dernier renseignement : les traces laissées ont des sens opposés. Nous en déduisons que l'objet est fixe par rapport à la Terre ; nous le retrouvons en effet sur la seconde photo sous une forme ponctuelle. L'énigme est désormais éclaircie, l'objet en question est bien un satellite, de plus il présente la propriété d'être géostationnaire.

## Où l'on cherchera à retrouver les sens de déplacement

La Terre accomplit un tour sur elle-même d'ouest en est (sens direct), par rapport au référentiel céleste. L'observateur, lui, assujéti au référentiel terrestre voit donc les étoiles se déplacer d'est en ouest. Comparons de nouveau les deux photographies. Recherchons sur le premier cliché une étoile brillante, puis son « itinéraire » sur le suivant. Nous obtenons ainsi le sens d'est vers l'ouest, soit sur la deuxième image la diagonale d'en haut à gauche vers le bas à droite. Remarquons aussi que sur le premier cliché le satellite géostationnaire a bien un mouvement identique à celui de la Terre par rapport aux étoiles, d'ouest en est.

## Renseignons notre photographie

À l'aide du logiciel Aladin<sup>1</sup>, réalisons une calibration astrométrique en pointant les mêmes étoiles sur le cliché du DSS (Digitized Sky Survey) et sur la photo 1.a. Cela nous permettra de connaître les coordonnées en ascension droite et déclinaison des étoiles et de tout objet paraissant dans la vue, d'orienter la photographie telle que celle proposée par le DSS, d'uniformiser l'échelle, de rajouter une grille de coordonnées..., sur l'original 1.a.

<sup>1</sup> <http://aladin.u-strasbg.fr/aladin-f.gml>

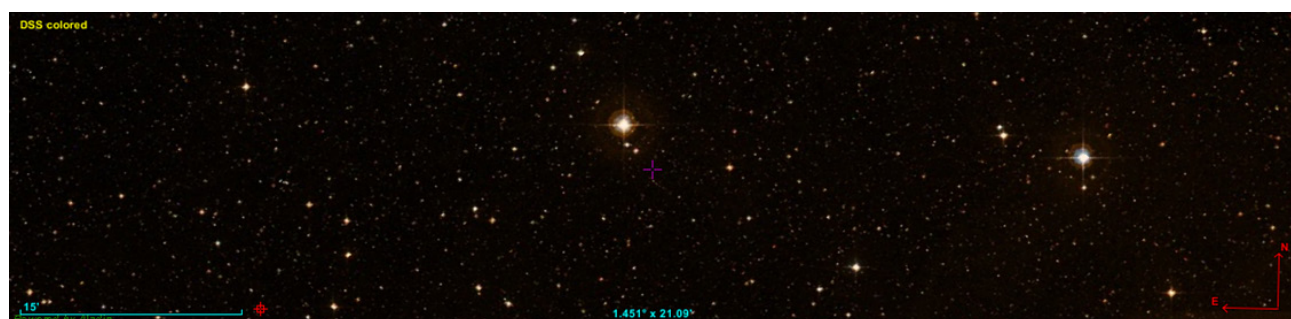


Fig.2.a. : Image du DSS permettant la calibration astrométrique.

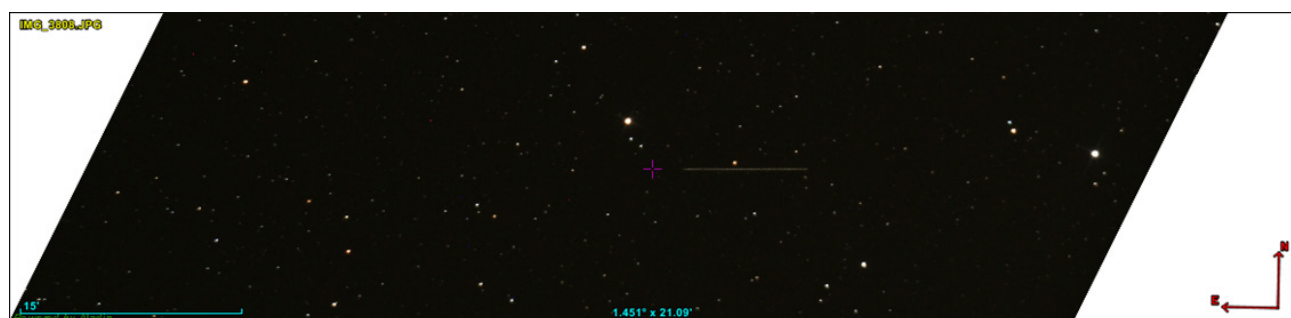


Fig.2.b. Photographie 1.a. orientée.

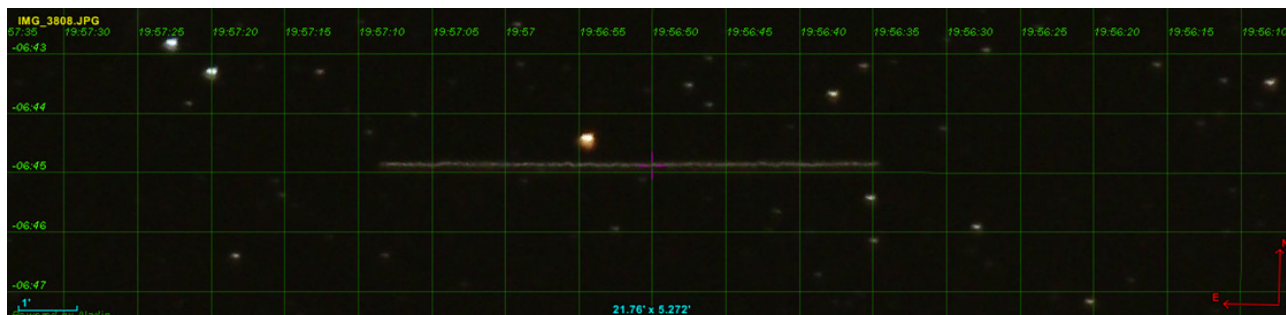
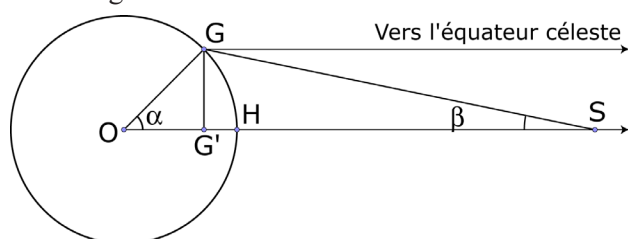


Fig.2.c. Zoom sur le filé du satellite géostationnaire avec grille des positions.

## Où l'on cherchera à retrouver la distance du satellite géostationnaire à la Terre

Cherchons à schématiser la situation. Depuis l'hémisphère nord, un satellite géostationnaire est vu sous l'équateur céleste, et ce d'autant plus que l'observateur est dans les hautes latitudes. En revanche, un observateur placé sur l'équateur terrestre verrait l'anneau des satellites géostationnaires confondu avec l'équateur céleste. Seul le premier cas nous permet, en usant d'un peu de géométrie, de faire une mesure de la distance  $h$  du satellite géostationnaire à la Terre.



O : centre de la Terre.

$R_T$  : rayon terrestre.

G : position de l'observateur.

S : le satellite géostationnaire.

$\alpha$  : latitude du lieu d'observation : Saint Benoît de Carmaux 44,05 °

$\beta$  : l'angle fait entre la position apparente du satellite depuis le lieu d'observation et l'équateur céleste. Environ 6° 45', mesuré sur la figure 2.c.

D'après la figure ci-dessus, il vient que :

$$G'S = \frac{GG'}{\tan \beta}$$

$$\text{Avec } GG' = OG \sin \alpha = R_T \sin \alpha$$

$$\text{Et } OG' = R_T \cos \alpha$$

$$\text{D'où } h = HS = OS - R_T = OG' + G'S - R_T$$

Donc :

$$h = R_T \cos \alpha + \frac{R_T \sin \alpha}{\tan \beta} - R_T = R_T \left( \cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\tan \beta} - 1 \right)$$

Soit après calcul avec les valeurs données  $h = 35\,634$  km. Avec une valeur théorique de  $h = 35\,786$  km, cela fait une erreur relative de 0,4 % imputable à la précision de la calibration et de la mesure de l'angle  $\beta$ .

## Comment photographier un satellite géostationnaire ?

La magnitude des satellites géostationnaires est d'environ 11 à 14. Aussi, faudra-t-il user d'un télescope de diamètre suffisamment grand, au risque de chercher un objet... invisible. Pour cela on peut utiliser la formule suivante donnant la magnitude limite.

$$\text{Magnitude limite} = 2 + 5,1 \times \log(\text{diamètre en mm}).$$

Pour le travail qui nous préoccupe, allons sur le site Calsky<sup>2</sup>, puis suivons les liens « satellite » puis « geostationary ». Choisissons dans la liste un satellite dont l'azimut est proche de 180° (sud) ; il sera ainsi plus haut dans ciel et donc plus facilement visible. Trois liens sont disponibles. En cliquant sur le nom du satellite, nous trouvons son statut de visibilité ainsi que son inclinaison, magnitude, coordonnées équatoriales et azimutales, éléments orbitaux... En cliquant sur ground track, nous obtenons une carte avec notre position, celle du satellite, sa zone de visibilité... Et enfin, en suivant star chart, les positions du satellite minute après minute devant les étoiles qui apparaissent. Il est alors possible pour le retrouver d'utiliser soit la raquette de la monture et l'un des deux systèmes de coordonnées, soit de suivre une étoile de même déclinaison que le satellite jusqu'à leur rapprochement.

## Sitographie

Deux sites d'intérêt permettant de simuler la trace au sol d'un satellite en orbite circulaire lors de son parcours. L'altitude et l'inclinaison sont ajustables. Pour voir la projection à la surface de la Terre d'un satellite géostationnaire, choisir une période de 86 ks (23 h 56 min 4 s), et une inclinaison  $i = 0^\circ$ . Il est intéressant d'observer la courbe en huit pour des valeurs d'inclinaison non nulle. Les orbites ne pouvant être que circulaires, ces courbes sont symétriques, ce qui ne serait pas le cas avec des orbites elliptiques.

<http://ressources.univ-lemans.fr/AccessLibre/UM/Pedago/physique/02/divers/satelstat.html>

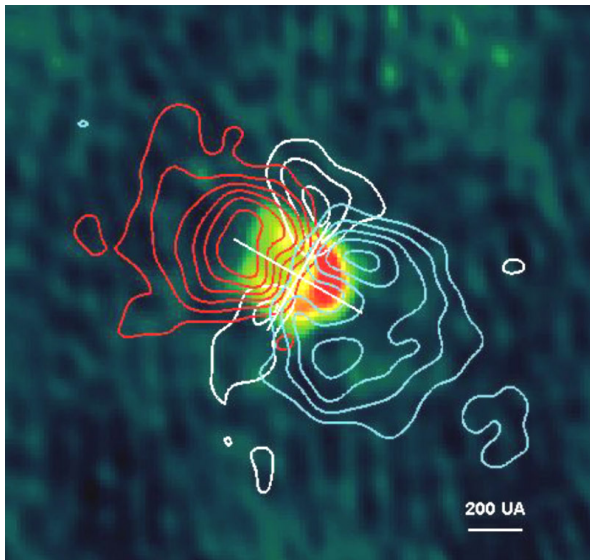
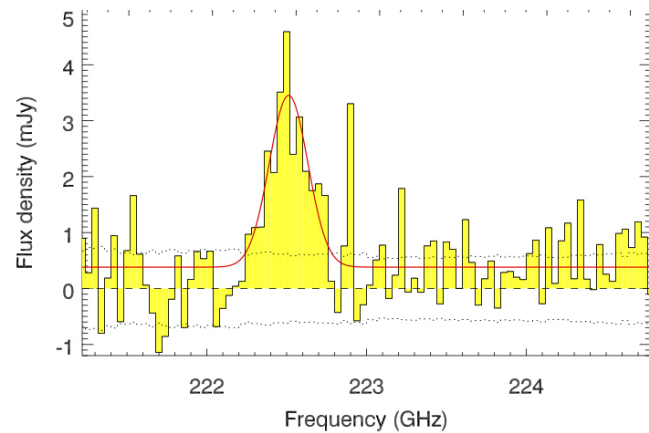
[http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve\\_tulloue/Meca/Planetes/geosat\\_F.php](http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Meca/Planetes/geosat_F.php)

<sup>2</sup> <http://www.calsky.com/>

# THÈME: RADIOASTRONOMIE

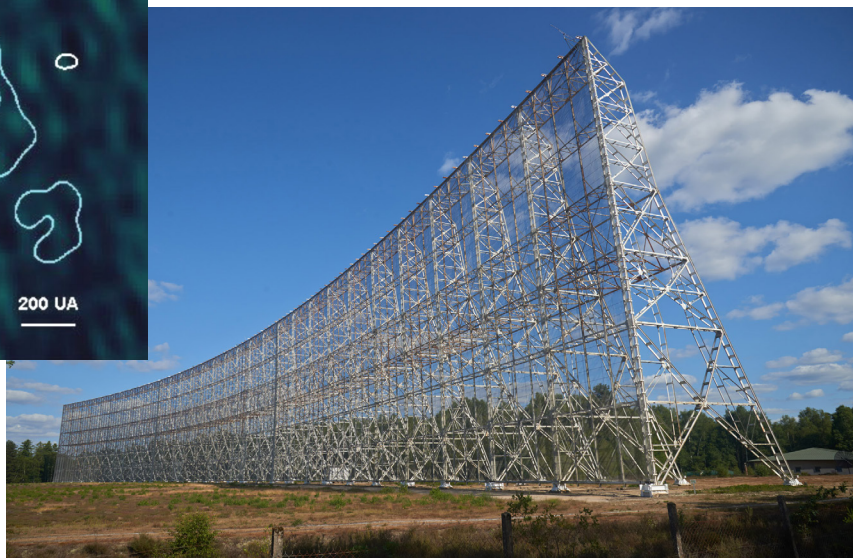
Ce spectre de la raie CII du carbone (en émission) et du continuum de poussières mesuré avec NOEMA a permis de déterminer avec précision le décalage vers le rouge du quasar de  $z = 7,54$ . Avec ces observations, les astronomes ont pu identifier la galaxie hôte du quasar.

*Crédit: Venemans, B.P. et al. 2017, ApJL 851, L8*



Disque de gaz en rotation autour du système binaire UY Aur. Les deux étoiles sont séparées de 130 unités astronomiques (18 heures lumière). Les isocontours traduisent ici la valeur de la vitesse du gaz.

*(Dutrey et al)*



La grande antenne du radiotélescope de Nançay, dans le Cher, mesure 200 m de large et 40 m de haut.

Les longueurs d'onde étudiées sont essentiellement de 21, 18 et 9 cm, correspondant à des raies de l'atome d'hydrogène HI (1,41 GHz), du radical OH (1,66 GHz) et du radical CH (3,3 GHz).

*(photo Wouter Hagens/Wikipedia)*



Vue panoramique d'ALMA (Atacama Large Millimeter Array) sur le plateau de Chajnantor au Chili, à 5 000 m d'altitude. Il est composé de 66 antennes de 7 à 12 m, pouvant être déplacées. ALMA observe dans le domaine millimétrique.

*(photo Babak Tafreshi/ESO)*

## Radioastronomie, notions de base

Pierre Causeret, Jean-Michel Vienney

*Après la lunette astronomique de Galilée et le télescope de Newton qui observent dans le visible, la radio-astronomie a permis d'ouvrir une nouvelle fenêtre sur l'Univers.*

### Rapide historique

Aux alentours de 1870, Maxwell interprète les ondes lumineuses comme une oscillation du champ électromagnétique. Il suggère que ce rayonnement existe à d'autres longueurs d'onde que le rayonnement visible, infrarouge ou ultraviolet.

Dans les années 1880, Hertz montre l'existence des ondes radio dont la longueur d'onde est un million de fois plus grande que celle de la lumière visible.

La communication radio se développe alors, en particulier pendant la première guerre mondiale.

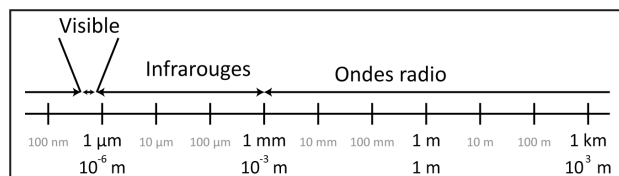
En 1933, Karl Janski, ingénieur de la société Bell, capte un signal provenant du centre de notre Galaxie.

Quelques années plus tard, un astronome amateur américain, Grote Reber, construit le premier radiotélescope.

Lors de la deuxième guerre mondiale, on améliore les techniques de communication radio et les radars. On découvre par exemple que le Soleil émet aussi des ondes radio.

La radioastronomie se développe réellement à partir des années 50 avec la construction de radiotélescopes de plus en plus grands.

### Ondes radio et longueur d'onde



La longueur d'onde de la lumière visible est comprise entre 400 et 800 nm. Pour les ondes radio, on va de 1 millimètre à plusieurs kilomètres... L'échelle du schéma ci-dessus est logarithmique (longueur d'onde multipliée par 10 quand on passe d'un trait au suivant).

On indique souvent la fréquence  $f$  d'une onde radio en hertz. Il s'agit du nombre d'oscillations par seconde, c'est l'inverse de la période  $T$  :

$$f = 1/T$$

Par exemple, une onde radio de 1 kHz (1 000 Hz) oscille 1000 fois par seconde, sa période est de 1/1000 s.

Quant à la longueur d'onde  $\lambda$  c'est la distance parcourue par l'onde en une période à la vitesse de la lumière  $c$ .

$$\text{On a donc : } \lambda = c \times T = c/f$$

Ce que l'on peut aussi écrire  $f \times \lambda = c$  ou  $f = c/\lambda$ .

Une longueur d'onde de 1 décamètre correspond à une fréquence  $f = 3 \times 10^8 \text{ m} / 10 \text{ m}$  soit  $3 \times 10^7 \text{ Hz}$  soit 30 MHz.

Voici par exemple une correspondance entre longueur d'onde et fréquence :

Longueur d'onde	1 mm	1 dam	1 m	1 km
Fréquence	300 GHz	3 GHz	300 MHz	300 kHz

On parle couramment d'onde millimétrique, centimétrique, décimétrique, kilométrique...

### Puissance et énergie, et résolution spectrale

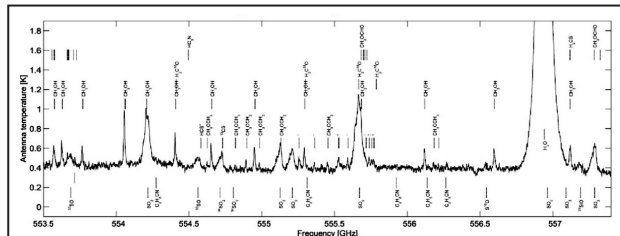
On s'intéresse à la densité spectrale de flux, puissance (en W) reçue par unité de surface (en  $\text{m}^2$ ) dans une bande de fréquence donnée (en Hz). Elle est en général tellement faible que pour l'exprimer les radioastronomes utilisent une unité particulière, le Jansky (Jy) :  $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Pour le Soleil, elle est de l'ordre de 50 000 Jy, mais pour la plupart des radiosources elle est plutôt de l'ordre de 1 Jy.

Dans le domaine visible, l'énergie associée à un photon est de l'ordre de l'électronvolt, et correspond à l'énergie associée à la transition entre les niveaux électroniques de l'atome. Dans le domaine radio cette énergie, beaucoup plus faible, est plutôt reliée aux niveaux de vibration et de rotation des molécules.

C'est ainsi que l'étude des spectres radio a permis de détecter dans le milieu interstellaire la présence de

très nombreuses molécules, parfois relativement complexes comme le méthanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$  autour de 12,18 GHz) ou le formaldéhyde  $\text{H}_2\text{CO}$  (14,49 GHz) jusqu'à l'aminoacétonitrile  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN}$ , précurseur de la glycine  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ , le plus simple des acides aminés.



*Spectre avec de nombreuses raies moléculaires.*

La résolution spectrale des radiotélescopes est telle qu'ils permettent en plus de déterminer avec une très grande précision les vitesses radiales par effet Doppler.

### Les antennes des radiotélescopes

Un instrument est construit pour observer dans un certain domaine de longueur d'onde. Or la taille caractéristique du détecteur élémentaire d'un radiotélescope est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du signal qu'il doit recevoir. La très grande étendue spectrale du domaine radio a conduit à construire des antennes de formes très variées : du simple fil tendu entre des mâts (domaine des ondes kilométriques) ou bobiné sur un cadre de manière plus sophistiquée, au cornet relié à un guide d'ondes (domaines centimétrique à submillimétrique) en passant par le classique dipôle des antennes UHF « Yagi » (les mêmes que celles qui nous permettent de recevoir la TV).



*Cornets guides d'onde.*

*Antenne UHF Yagi.*



*Antennes de Jansky.*

*Radiohéliographe de Nançay.*

Comme dans le domaine optique, l'énergie est d'abord « concentrée » à l'aide d'une combinaison de surfaces collectrices, souvent paraboliques.

Les écarts à la forme idéale de ces surfaces doivent être inférieurs à  $\lambda/10$  (le dixième de la longueur d'onde). Si dans le domaine visible, cela demande des miroirs polis avec une précision de quelques dizaines de nanomètres, pour un radiotélescope observant dans le domaine centimétrique les principaux défauts du miroir ne doivent pas dépasser le millimètre (pour un miroir dont les dimensions peuvent, comme à Nançay ou Arecibo atteindre plusieurs centaines de mètres).

Le maillage du miroir télescope doit quant à lui être inférieur à la longueur d'onde observée : toujours à Nançay, le miroir est un grillage dont les mailles mesurent environ 1 cm de côté.

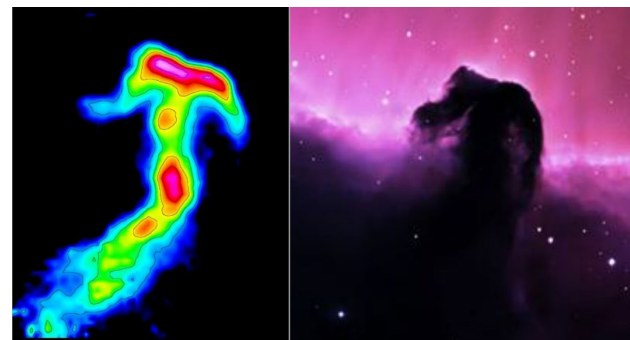
La résolution spatiale d'un instrument est d'autant meilleure que la longueur d'onde observée est courte et que le diamètre du miroir est grand.

Un radiotélescope de 25 m de diamètre observant à 21 cm de longueur d'onde a une résolution spatiale de  $0,5^\circ$ , le diamètre de la Lune, ce qui n'est pas précis pour associer une source radio à un objet visible par exemple. Il a donc fallu construire des radiotélescopes les plus grands possibles. Celui d'Arecibo, à Porto Rico, mesure 305 m de diamètre.

Une autre solution pour améliorer la résolution spatiale est de combiner les signaux reçus par plusieurs antennes éloignées. C'est l'interférométrie, utilisée par exemple sur le plateau de Bure dans les Alpes, mais aussi à l'échelle de la planète. La technologie actuelle, permet en effet de numériser et dater les signaux reçus avec assez de précision pour combiner des signaux acquis par des antennes distantes de plusieurs milliers de kilomètres.

### Principales radiosources

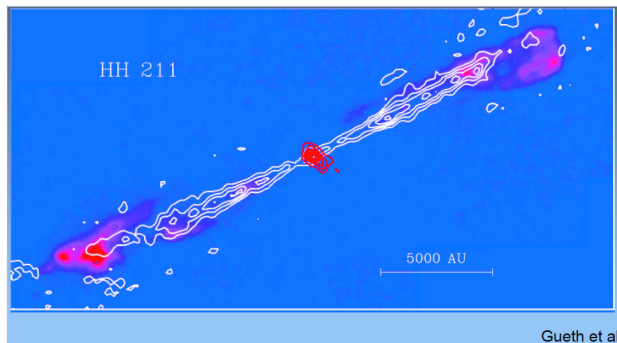
En vertu de la loi de Wien, qui associe la longueur d'onde du maximum d'émission d'une source en équilibre thermique à sa température, le domaine radio donne accès à l'Univers froid : nuages de gaz et de poussières interstellaire et intergalactiques.



*Image radio de IC434 avec la nébuleuse obscure de la Tête de Cheval.*

C'est ainsi qu'il est possible de tracer la distribution du gaz et des poussières, d'étudier la rotation des galaxies bien au-delà de leur partie visible ou de suivre la rotation de disques protoplanétaires.

Mais pour de nombreuses sources, l'intensité de l'émission dans le domaine radio ne peut s'expliquer que par d'autres mécanismes. On peut citer l'émission synchrotron par les jets électro-niques relativistes émis par certains noyaux actifs de galaxies, ou soumis à des champs magnétiques très intenses comme dans le cas des pulsars, étoiles à neutrons en rotation rapide.



Émission synchrotron par des jets d'électrons relativistes.

Mais toutes les étoiles émettent aussi en radio. Le Soleil, par exemple, a son maximum d'émission dans le visible, mais on trouve dans son spectre toutes les fréquences, et en particulier des fréquences radio.

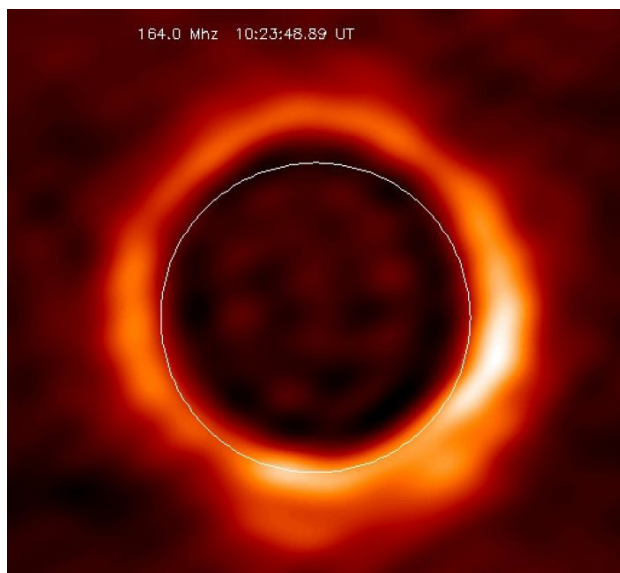


Image du Soleil à 164 MHz (Nançay).

Dans le Système solaire, les radioastronomes suivent aussi assidûment l'émission des planètes, en particulier Jupiter dont l'émission est si intense qu'elle est accessible aux amateurs, mais aussi les queues cométaires : on a ainsi accès à leur composition, ainsi qu'à la vitesse des particules et à l'intensité du champ magnétique local.

C'est aussi dans le domaine radio que Jocelyn Bell a découvert en 1967 le premier pulsar qui fut ensuite associé à une étoile à neutrons en rotation rapide.

La période de rotation de ces derniers est si stable qu'on a un temps pensé à les utiliser comme étalons de mesure du temps.

## Les images des radiotélescopes

En « scannant » une région du ciel il est possible, comme dans le domaine visible, de reconstruire des images traduisant simplement l'intensité du signal par une variation de niveau de gris ou de couleur, ou plus simplement par le tracé d'isocontours analogues aux isobares de nos cartes météorologiques.

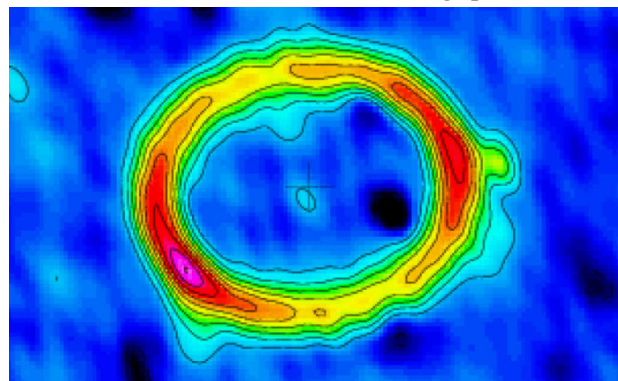


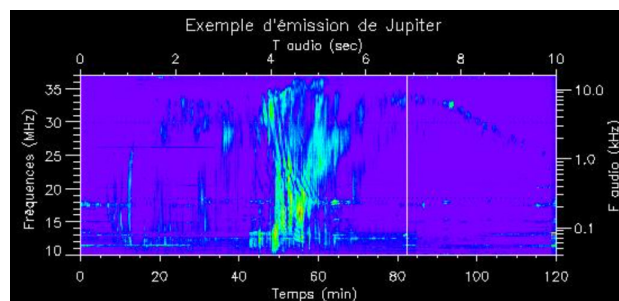
Image d'un disque protoplanétaire (CG Tau).

Les images publiées peuvent traduire des résultats obtenus après des traitements très sophistiqués. Par exemple l'image peut représenter des variations de vitesse mesurées par l'effet Doppler. L'échelle colorée ou les isocontours traduisent alors la valeur de la vitesse du gaz, parfois corrigée de divers effets de projection (voir par exemple l'image de UY Aur page 9).

On peut aussi chercher à traduire la répartition de la concentration d'une espèce chimique.

Une image peut aussi représenter l'évolution d'un phénomène au cours du temps. On construit alors un spectrogramme dans lequel le temps apparaît en abscisses, la fréquence en ordonnées, et où l'intensité est représentée par une échelle de niveaux de gris ou de couleurs (voir figure 7 page 24).

Certains ont même parfois fait appel à notre ouïe en transposant dans le domaine audible (de 20 Hz à 20 kHz) les données obtenues dans des domaines de fréquence très différents.



Spectre dynamique converti en son (P. Zarka, C. Briand) sur <https://www.obs-nançay.fr/La-radioastronomie-280.html>.

# 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 » ?

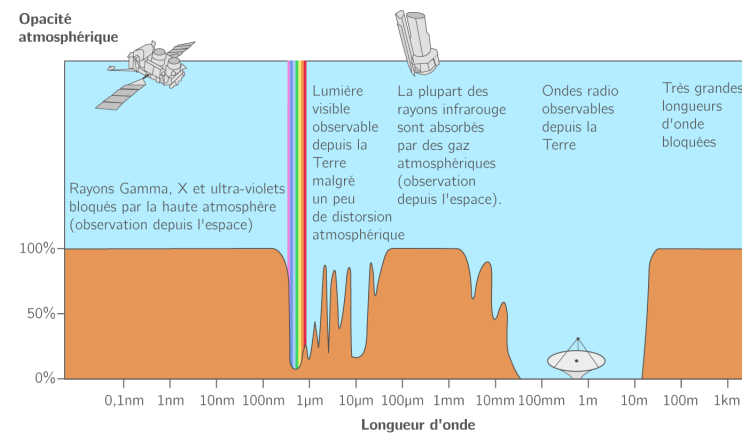
Quand on parle de « radio », c'est généralement grâce au contexte qu'on arrive à comprendre de quoi on parle : on va « passer » une radio (rayons X, imagerie médicale), on « écoute » la radio (bande AM-FM), on « communique » par radio (RADAR, radiotélécommunication, mobiles...).

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 « décimétrique » (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).

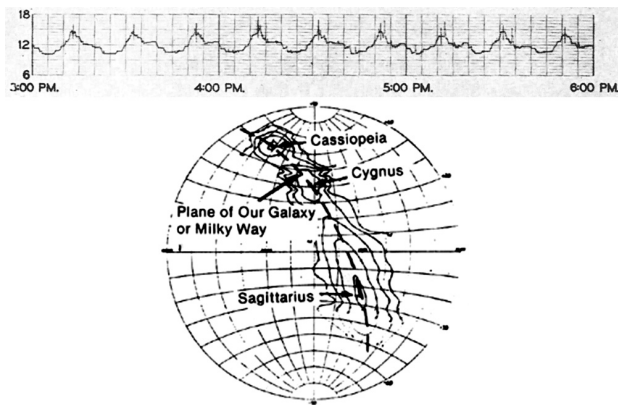


Fig.2. En haut, la Voie lactée par K. Jansky à 20 MHz.  
En bas, carte de la Voie lactée par G. Reber à 160 MHz.

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 ( $\delta\lambda \propto D_{\lambda}$ ). 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

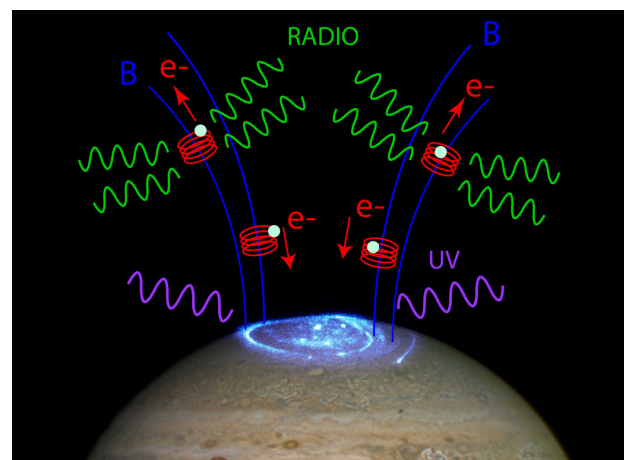
L'objet n'est pas ici de dresser une liste complète des sources radio, il va sans dire que la richesse des découvertes faites dans le domaine radio remplit très facilement plusieurs rayons d'étagères. Il existe cependant une universalité des objets et des processus de rayonnement radio. Les ingrédients 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 *planeterrella*<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).

<sup>1</sup> <http://planeterrella.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.

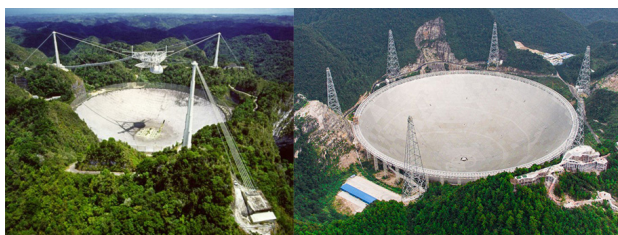


Fig.4. Les radiotélescopes d'Arecibo et FAST.

### **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 :

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

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 » créée 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

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

<sup>4</sup> <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.

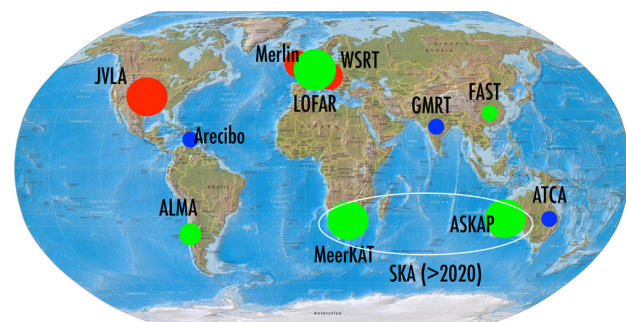
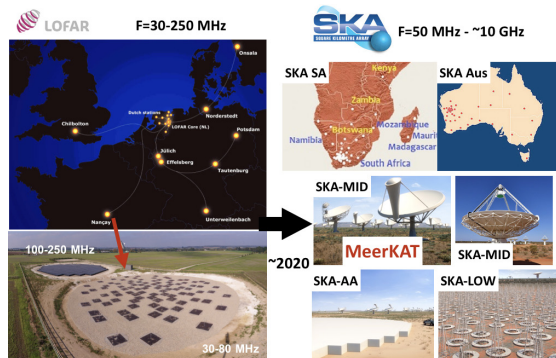


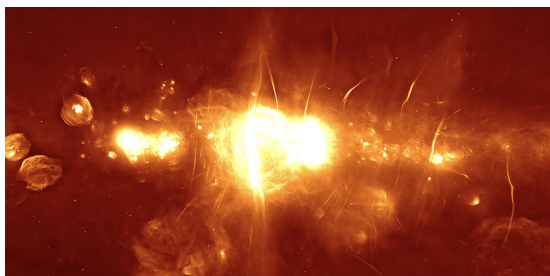
Fig.5. Les grands radiotélescopes dans le monde (bleu : instruments historiques, rouge : instruments ayant bénéficiés d'une amélioration récente, vert : nouveaux instruments).

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 effectivement 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 [www.obspm.fr/les-radiotelesopes-d-eu-hou.html](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 [www.lesia.obspm.fr/perso/philippe-zarka/Chants.html](http://www.lesia.obspm.fr/perso/philippe-zarka/Chants.html)

# AVEC NOS ÉLÈVES

## Des radiotélescopes pour l'éducation

Frédéric Pitout, observatoire Midi-Pyrénées,  
Institut de recherche en astrophysique et planétologie, Toulouse

*Un radiotélescope éducatif à l'Observatoire Midi-Pyrénées permet de mesurer les émissions à 21 cm de l'hydrogène neutre dans notre Galaxie et d'en déduire sa vitesse de rotation. Celle-ci n'étant pas conforme aux lois de Newton on suppose qu'il manque une forme de la matière invisible.*

Fin 2013, l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP) s'est équipé d'un radiotélescope à des fins éducatives (travaux pratiques et travaux d'initiative personnelle encadrés d'étudiants, ateliers scientifiques et techniques et travaux personnels encadrés de lycéens, etc.). Il est installé sur le toit d'un bâtiment toulousain de l'OMP et a été intégré dans le réseau de radiotélescopes de *Hands-on Universe* en Europe (EU-HOU, <http://euhou.obspm.fr/public/>). Il permet de mesurer les émissions à 21 cm de l'hydrogène de notre Galaxie.

### Caractéristiques techniques

Le système comprend une antenne parabolique de trois mètres de diamètre (figure 1) qui est orientable dans toutes les directions du ciel, une tête de réception

et une chaîne de traitement du signal qui permettent de recevoir la fréquence de 1 420 MHz, soit une longueur d'onde dans le vide de 21 cm.

Cette fréquence correspond à la transition hyperfine de l'atome d'hydrogène (appelé souvent hydrogène neutre et noté HI en spectroscopique) qui est relativement peu abondant dans notre Galaxie : 5 à 10 % de la masse totale. Cette émission se produit quand l'électron de l'atome d'hydrogène passe spontanément d'un état de spin  $F = 1$  (quand les moments cinétiques de spin du proton et de l'électron ont le même signe) à l'état  $F = 0$  (signes différents).

Le premier état ayant un niveau d'énergie plus élevé que le second, la transition s'accompagne d'une libération d'énergie sous forme d'un photon à 1 420 MHz (figure 2 page suivante).



Fig.1. Antenne radio de l'OMP.

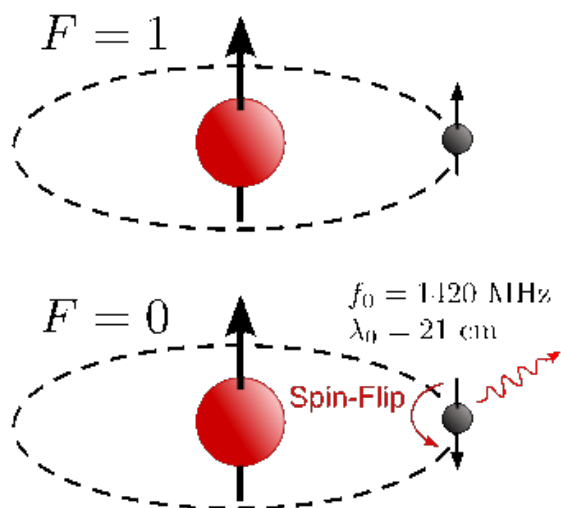


Fig.2. Émission à 21 cm par inversion du spin de l'électron d'un atome d'hydrogène (wikicommons).

Toute source radio suffisamment puissante et émettant à cette longueur d'onde (disque de la Galaxie, Soleil, pulsars) est ainsi observable.

Évidemment, on sait que la résolution d'un tel instrument sera modeste. On rappelle que le pouvoir séparateur d'un instrument est proportionnel à la longueur d'onde observée et à l'inverse du diamètre de la surface collectrice. En radioastronomie, étant données les grandes longueurs d'onde, on a souvent des instruments très grands, de plusieurs dizaines de mètres de diamètre. Ici, avec 21 cm de longueur d'onde observée et les 3 m de diamètre de l'antenne, le pouvoir séparateur est de l'ordre de 5°. Pour donner une idée, c'est environ 10 fois le diamètre apparent du Soleil...

### Un exemple d'utilisation, la courbe de rotation de la Galaxie

Le radiotélescope de l'OMP, comme ceux du réseau EU-HOU, est le plus souvent utilisé pour mesurer la

courbe de rotation de notre Galaxie par la méthode dite des points tangents. Il s'agit de pointer dans plusieurs directions dans le plan du disque galactique et de mesurer dans chaque direction le pic d'émission correspondant au décalage Doppler le plus grand. En effet, dans une direction donnée, la ligne de visée peut intersecter plusieurs régions d'émission (bras spiraux) et l'antenne reçoit donc des émissions radios provenant de plusieurs bras spiraux. Ces derniers n'ayant pas les mêmes vitesses aux points d'intersection avec la ligne de visée, les décalages Doppler sont différents et ils apparaissent comme des pics d'émissions à des fréquences différentes dans les spectres mesurés (figure 4). On peut montrer que la mesure correspondant au décalage Doppler le plus grand (en valeur absolue) correspond à une mesure tangentielle à la rotation.

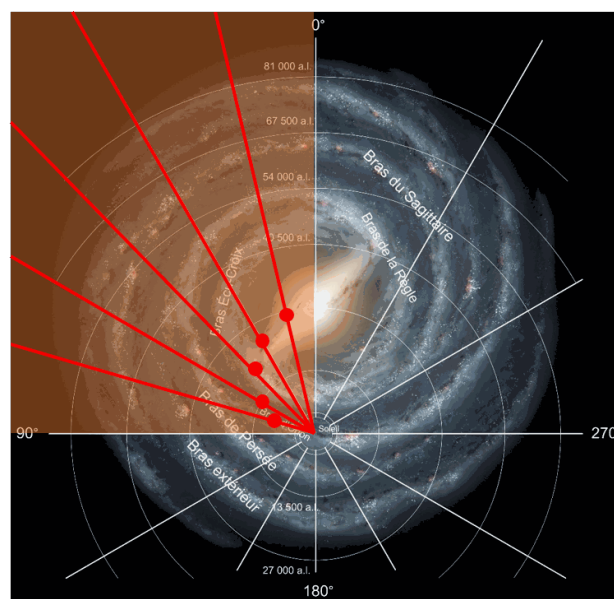


Fig.3. Représentation de notre Galaxie avec les longitudes galactiques  $l$ . Dans la zone  $0 < l < 90^\circ$  zone orangée), des mesures dans différentes directions sont effectuées. Selon chaque direction (en rouge), la vitesse maximale mesurée correspond au point tangent à la rotation de la Galaxie (points rouges).

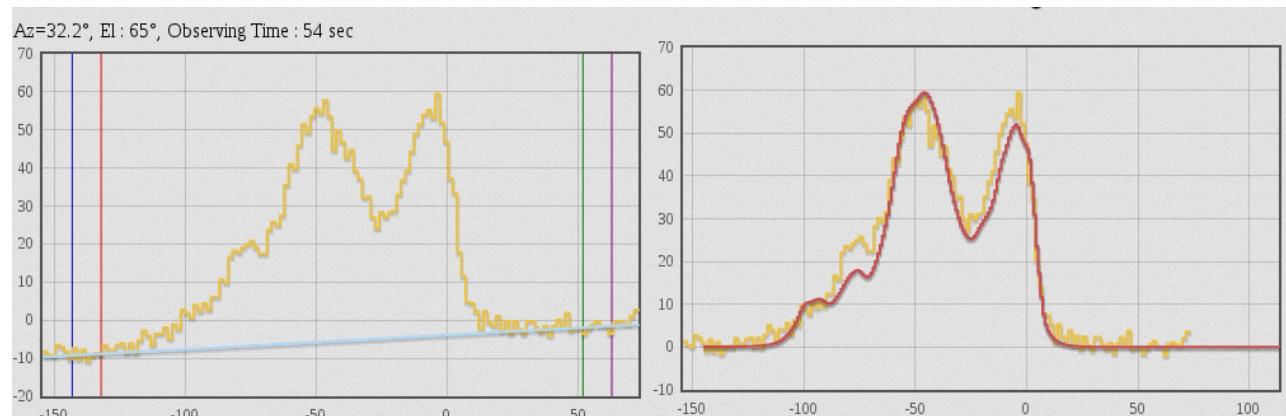


Fig.4. Exemple de spectre obtenu avec l'antenne de l'OMP. Sur l'image de droite a été ajoutée la courbe (orange) du grand relevé Leiden/Argentine/Bonn (LAB).

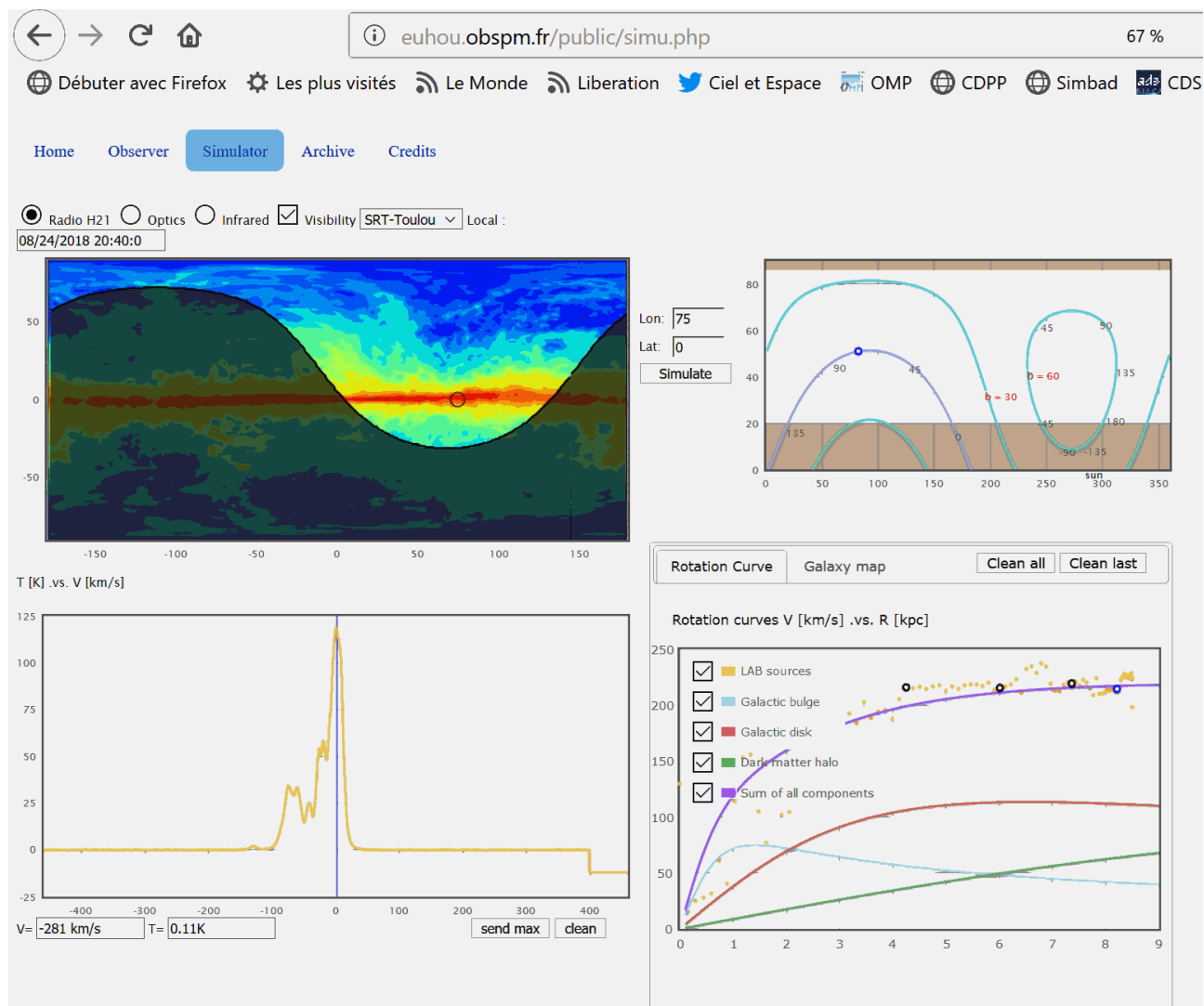
En repérant le décalage maximum (et donc la vitesse maximale) dans chaque direction de pointage, on peut reconstruire la courbe de rotation de la Galaxie (figure 5).

La forme de la courbe de rotation avec une vitesse qui reste constante avec la distance radiale qui augmente est un défi à l'entendement. En effet, les lois élémentaires de la dynamique (lois de Newton) prévoient une vitesse de rotation qui diminue avec la distance. Il est alors intéressant de la comparer aux courbes de rotation théoriques du bulbe et du disque galactiques.

On constate, même si c'est malaisé de visu, que pour obtenir la courbe de rotation de l'ensemble de la Galaxie, l'addition de ces courbes théoriques

ne suffisent pas pour obtenir la courbe de rotation mesurée.

En clair, la masse de la Galaxie semble insuffisante pour expliquer sa courbe de rotation et pour reproduire cette dernière, il faut ajouter de la matière invisible, la fameuse « matière noire » notée *dark matter halo* (demi-droite verte dans panneau supérieur droit de la figure 5. En ajoutant cette composante, on obtient la courbe théorique violette qui reproduit bien mieux les points de mesures.



**Fig.5.** Interface (ici du simulateur pour l'antenne toulousaine à la date du 24 août 2018) permettant de faire les mesures et d'exploiter les résultats. La direction de pointage est indiquée par les deux panneaux du haut ; le spectre mesurée ou simulé en bas à gauche ; et la courbe de rotation en bas à droite. Ce dernier panneau contient les points de « mesure » (ronds bleus), le relevé LAB (en jaune), les courbes théoriques du bulbe (bleu clair) et du disque (rouge) galactiques, la courbe de matière noir (vert) et la somme des trois (violet).

# ASTRONOMIE AMATEUR

## FRIPON et Vigie-Ciel

### Radio astronomie et chasse aux météorites

**Jean-Louis Rault**, président de la commission radioastronomie de la Société Astronomique de France, directeur de la commission radio de l'International Meteor Organization

*L'étude de notre Système solaire est facilitée par l'observation des météores et la recherche au sol de météorites. Les projets FRIPON et Vigie-Ciel de l'Observatoire de Paris et du Muséum National d'Histoire Naturelle sont succinctement décrits ici, et des travaux pratiques de détection radio des météores vous sont proposés.*

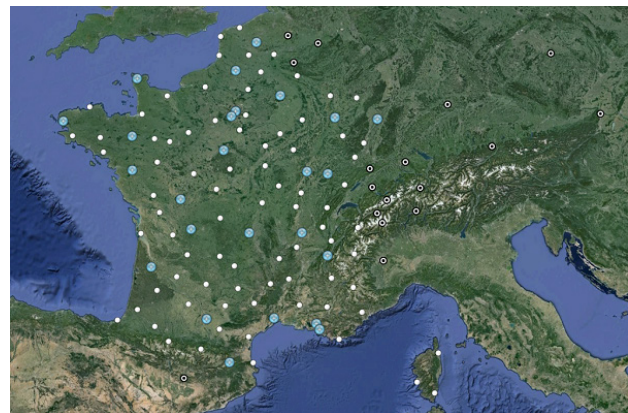
#### Météoroïdes, météores et météorites

Avec les programmes FRIPON (Fireball Recovery and Interplanetary Observation Network) et Vigie-Ciel<sup>1</sup>, des astronomes de l'Observatoire de Paris et des cosmochimistes du Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) étudient la formation et l'évolution de notre Système solaire. Les météoroïdes (poussières ou petits corps rocheux ou métalliques souvent issus d'astéroïdes ou de comètes) qui gravitent dans l'espace autour du Soleil sont appelés météores lorsqu'ils deviennent lumineux dans le ciel en s'échauffant par frottement à plusieurs milliers de degrés Celsius lors de leur entrée à très haute vitesse (de 11 à 72 km/s) dans l'atmosphère terrestre. Les objets assez solides et assez gros pour résister à leur traversée dans l'atmosphère et pour tomber au sol sont appelés météorites.

Au XIX<sup>e</sup> siècle, 46 nouvelles météorites ont été découvertes en France, alors qu'au XX<sup>e</sup> siècle, on n'en dénombrait plus que 13, tout simplement parce que les modes de vie ont changé, et non pas parce qu'il tombait moins d'étoiles filantes sur Terre ! C'est ce constat qui a incité l'Observatoire de Paris et le MNHN à lancer les programmes de recherche FRIPON et Vigie-Ciel.

#### Le réseau FRIPON

Pour observer les étoiles filantes, calculer leurs orbites (afin de connaître leurs corps-parents) et déterminer avec la meilleure précision possible leur point de chute, l'Observatoire de Paris a déployé un réseau d'une centaine de caméras sur tout le territoire français. FRIPON-Europe a vu le jour récemment, et le réseau s'étend dorénavant aux Pays-Bas, à la Belgique, au Royaume-Uni, à l'Autriche, à l'Allemagne, à l'Espagne, à l'Italie, etc.



*Fig.1. Répartition du réseau de caméras FRIPON sur le territoire français et dans les pays limitrophes.*

Chaque caméra observe toute la voûte céleste sur 360°, de jour comme de nuit, grâce à un objectif grand-angle, dit « fish-eye ». Les images prises à 30 vues par seconde sont analysées en temps réel par un petit ordinateur associé à chaque caméra, ordinateur qui détecte toutes les cibles en mouvement. Tout objet se déplaçant à moins de 7 km/s (avion, satellite artificiel, chauve-souris, oiseau, insecte, etc.) n'est pas pris en compte. En cas de détection d'un objet rapide, une alerte est envoyée par Internet à un serveur central situé au Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM), et les vidéos sont téléchargées pour stockage et analyse. Le fait qu'un objet soit observé en même temps par plusieurs caméras distantes de 100 km ou plus est un bon indice qu'une étoile filante a effectivement été observée. Un calcul d'orbite et de zone de chute peut alors être lancé qui, outre les données vidéo, prend en compte les vents en altitude mesurés par Météo-France qui risquent de dévier la chute du météore.

<sup>1</sup> <https://www.fripon.org/>  
<https://www.vigie-ciel.org/>



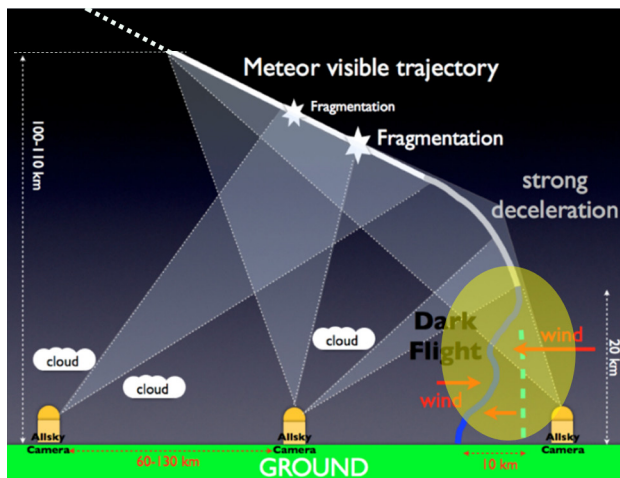


Fig 2. Triangulation d'une cible avec plusieurs caméras.

Le réseau de caméras permet de déterminer avec une bonne précision les données concernant la trajectoire des bolides dans l'atmosphère, mais leur vitesse n'est pas déterminée avec précision, ce qui risque d'induire de grosses erreurs sur les calculs d'orbites autour du Soleil. C'est la raison pour laquelle un réseau de 25 récepteurs radio a été ajouté à la centaine de caméras.



Fig.3. Répartition des récepteurs radio associés à certaines caméras FRIPON. En jaune : zone de couverture théorique optimale de détection radio des météores par le radar GRAVES.

Ces récepteurs fonctionnent en « mode radar multistatique » : le radar GRAVES de l'Armée de l'Air (situé près de Dijon), destiné à la détection des satellites, émet en continu à une fréquence d'environ 140 MHz. Les échos de ses émissions sur le plasma accompagnant les météores sont reçus par les récepteurs FRIPON (voir la figure 6). En cas de détection d'une étoile filante par plusieurs caméras, les enregistrements radio correspondants sont envoyés vers le serveur central du LAM. L'analyse spectrale de ces enregistrements permet de mesurer les décalages Doppler-Fizeau de ces échos, décalages

dus à la vitesse de déplacement des cibles<sup>2</sup>. On peut donc, grâce à plusieurs récepteurs, mesurer avec une précision de quelques dizaines de mètres par seconde la vitesse absolue<sup>3</sup> des météores.

## Le projet Vigie-Ciel

Vigie-Ciel, qui comporte une forte composante de sciences participatives, est un projet associé à FRIPON. Ses vocations premières sont de proposer à un vaste public (novice ou amateur d'astronomie) d'observer les étoiles filantes, d'envoyer des rapports d'observation et de participer à des campagnes de recherche de météorites sur le terrain. Un réseau de correspondants Vigie-Ciel régionaux a été mis sur pied. Une vingtaine de mallettes pédagogiques sont mises à disposition des écoles, des clubs d'astronomie, etc., par le MNHN. Ces mallettes comportent des fiches d'explications, des expériences pédagogiques, des météorites variées et différents matériels de mesure (boîte à lumière polarisée pour examiner des tranches minces de minéraux, instrument de mesure de la perméabilité magnétique d'échantillons de roches).



Fig.4. Mallettes pédagogiques du MNHN.

Des campagnes d'entraînement à la recherche de météorites sont régulièrement organisées sur le terrain avec l'aide de clubs d'astronomie.

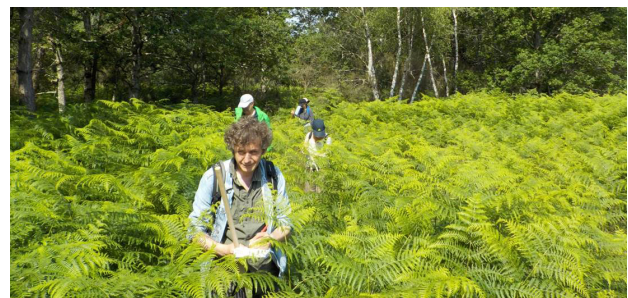


Fig.5. Recherche (sans succès !) d'une météorite tombée en forêt de Chambord. Les hautes fougères n'ont pas facilité la tâche...

<sup>2</sup> NDLR : voir CC n° 161 (mars 2018).

<sup>3</sup> Vitesse mesurée dans un repère terrestre ici.

## Zoom sur le système radio FRIPON

Et si vous observiez vous-même les météores en radio ? Le cahier des charges du système d'observation radio FRIPON a été conçu avec les objectifs principaux suivants : simplicité de mise en œuvre, efficacité, coût raisonnable.

De tels systèmes ont déjà été mis en œuvre avec succès dans le cadre des Olympiades de la Physique (Lycée André Maurois de Deauville) et de plusieurs Travaux Personnels Encadrés (par exemple avec des élèves d'un lycée de Strasbourg).

Pour observer les météores en radio, on utilise le phénomène physique suivant: les ondes radio-électriques sont réfléchies par les électrons libres du plasma entourant le météore en mouvement, et par les électrons libres de la traînée ionisée qui suit le météore (figure 6). Le plasma (ions + électrons libres + molécules et atomes neutres de l'atmosphère et du météore) est produit par le frottement intense et la chaleur résultants de l'entrée hypervélocité du météore dans l'atmosphère. En observant le météore sous différents angles avec des récepteurs radio espacés, on peut déterminer avec précision la vitesse absolue du météore observé. La figure 7 montre un exemple de spectrogramme obtenu.

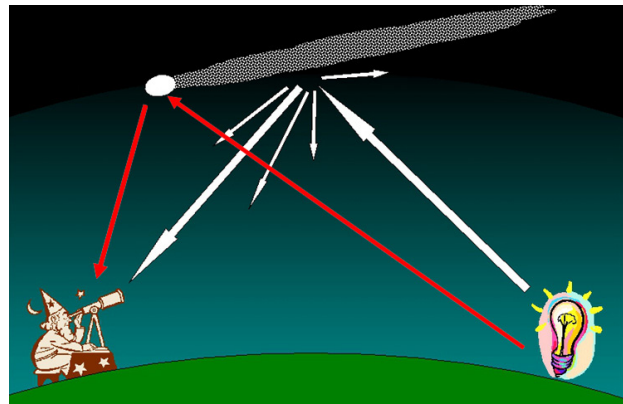
Une station d'observation radio se compose essentiellement des éléments suivants :

- une antenne Yagi 4 éléments ou une antenne verticale colinéaire<sup>4</sup> ;
- un récepteur numérique FunCube Pro<sup>5</sup> ;
- un câble coaxial 50 ohms de longueur inférieure à 20 m ;
- un PC sous Windows 7 ou Windows 10 équipé d'un écran couleurs et de haut-parleurs ;
- un disque dur externe de 1 ou 2 To pour stocker les données brutes ;
- une suite de logiciels dédiés.

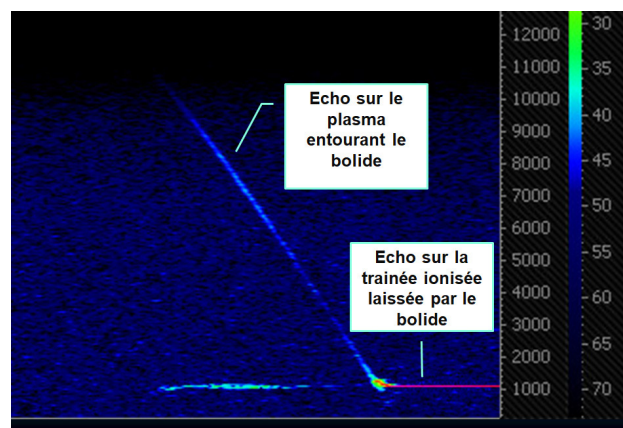
L'antenne est à placer sur un toit bien dégagé, et éloignée de tout obstacle (mâts, murs, câbles électriques, etc.). Si l'antenne choisie est de type directionnelle (antenne Yagi), il faut l'orienter en direction de Dijon. Le câble coaxial qui relie l'antenne au récepteur (qui est connecté directement au PC par une prise USB) doit être le plus court possible, pour ne pas atténuer les signaux reçus (longueur maximale : 20 m environ).

4 Voir par exemple modèle X-200N sur [www.wimo.com/omnidirectional-vhf-antennas-diamond\\_e.html](http://www.wimo.com/omnidirectional-vhf-antennas-diamond_e.html) et modèle WY204 sur [http://www.wimo.com/yagi-antennas-mo\\_e.html#wimoyagi](http://www.wimo.com/yagi-antennas-mo_e.html#wimoyagi)

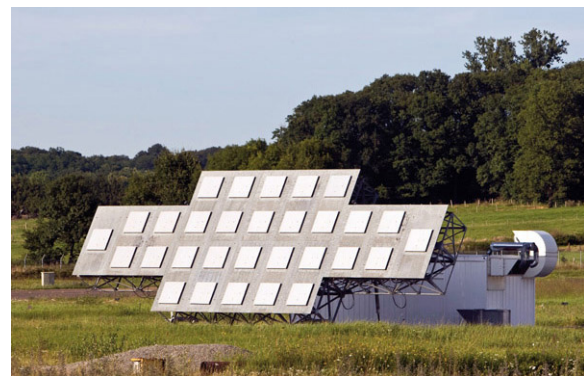
5 [https://funcubedongle.3dcartstores.com/checkout\\_one.asp](https://funcubedongle.3dcartstores.com/checkout_one.asp)



**Fig.6.** À droite, l'émetteur du radar GRAVES illumine le ciel. À gauche, l'observateur reçoit un écho de l'émission réfléchi sur la traînée ionisée du météore, et un écho réfléchi sur le plasma entourant l'objet.



**Fig.7.** Sur ce spectrogramme d'un écho sur météore, on distingue une raie spectrale inclinée correspondant à la variation rapide de fréquence due au corps en mouvement. L'axe des abscisses représente le temps qui s'écoule, et l'axe des ordonnées les fréquences analysées. Une palette de couleurs (du noir au rouge) indique les intensités des signaux analysés. Quand le météoroïde s'approche, le décalage Doppler se fait vers les courtes longueurs d'onde donc du côté des hautes fréquences. La fréquence reçue est donc supérieure à la fréquence d'émission. Au cours de sa chute, la vitesse radiale diminue et la fréquence reçue se rapproche de la fréquence d'émission. La raie horizontale est due à l'écho sur la traînée ionisée. La fréquence de cette raie horizontale est affectée par les dérives éventuelles de la traînée ionisée réfléchissante, traînée qui peut dériver au gré des vents zonaux et méridionaux qui peuvent souffler à très haute altitude.

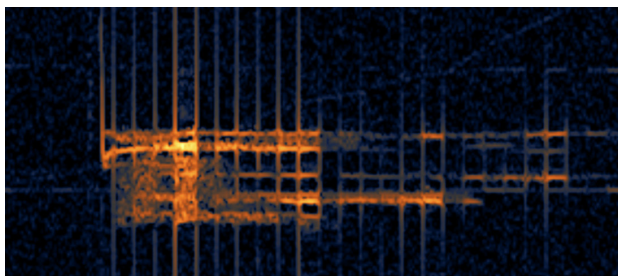


**Fig.8.** Une des 4 antennes d'émission du radar GRAVES utilisée par FRIPON.

Pour ne pas surcharger cet article avec une foule de détails techniques concernant l'installation et la mise en œuvre du matériel et des logiciels, nous renvoyons le lecteur sur un site de stockage Google Drive<sup>6</sup> qui contient un manuel d'installation complet et tous les logiciels (gratuits) indispensables au système d'observation radio.

Ce système permet d'observer en temps réel les météores sporadiques (plusieurs dizaines par heure) et les météores appartenant aux essaims qui réapparaissent chaque année à dates fixes<sup>7</sup> (plusieurs centaines par heure), comme les Perséides au mois d'août ou les Géminides au mois de décembre. À des fins d'études, le système permet de rejouer des enregistrements stockés sur disque dur externe, ou de les envoyer à l'Observatoire de Paris, puisque les enregistrements sont produits dans un format directement utilisable par l'équipe FRIPON.

Les analyses spectrales effectuées permettent non seulement de visualiser, d'entendre et de compter les météores détectés, mais également d'évaluer les vitesses radiales des cibles observées (météores bien sûr, mais aussi avions et station spatiale ISS qui réfléchissent également très bien les ondes radio VHF). En analysant finement les échos reçus, on peut également constater que les traînées ionisées des météores sont déformées par les vents qui règnent en haute altitude (vents zonaux et méridionaux vers 80 km d'altitude).



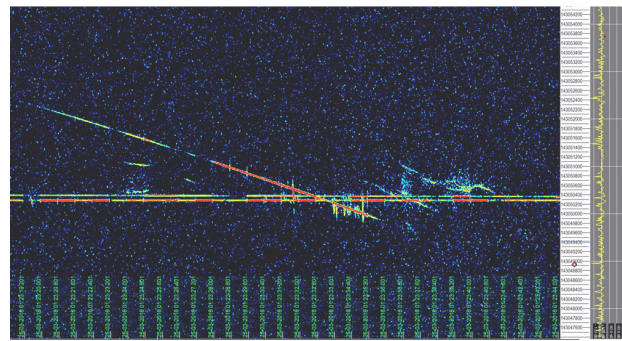
**Fig.9.** Exemple d'écho distordu sur une traînée de météore déformée par les vents en altitude. Axe horizontal : temps qui s'écoule, axe vertical : fréquences décalées par effet Doppler-Fizeau.

Il arrive également que de débris spatiaux se consumant dans l'atmosphère soient détectés par les récepteurs radio FRIPON. Le 25 mars 2018 par exemple, de nombreux observateurs visuels du Sud de la France et d'Italie signalaient l'apparition d'un bolide au-dessus de la Méditerranée. L'analyse spectrale des signaux reçus par les stations radio de Brest, puis Talence, Caen, Narbonne, Bruxelles,

<sup>6</sup> [https://drive.google.com/open?id=1cUffkiE3u\\_vq4cRk0\\_OezhYdyXVafWr](https://drive.google.com/open?id=1cUffkiE3u_vq4cRk0_OezhYdyXVafWr)

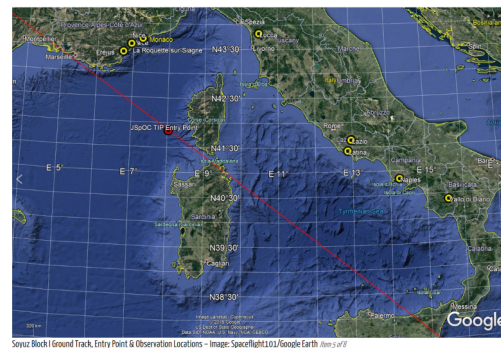
<sup>7</sup> <https://www.imo.net/files/meteorshower/cal2018fr.pdf>

Toulouse, Gramat, Sutrieu, Lille et Marseille (voir figures 10 et 11) montrait la désagrégation en plusieurs morceaux d'un étage de lanceur Soyouz et sa chute au large des côtes Ouest de la Corse.



**Fig.10.** On distingue sur ce spectrogramme la désintégration en plusieurs morceaux d'un lanceur Soyouz qui est retombé au large de la Corse en mars 2018.

Les données vidéo de cet événement n'ont pas été conservées, puisque la vitesse de l'engin était d'environ 7 km/s et que seules les cibles possédant une vitesse de 11 km/s ou plus sont susceptibles d'être des étoiles filantes.



**Fig.11.** Le point rouge « JSpOC TIP Entry Point » pointe la zone de chute en mer des débris d'un lanceur Soyouz.

Mettre en œuvre une station d'observation radio de météores est un projet à la portée d'un groupe motivé. Le point le plus difficile est de souder correctement les prises coaxiales du câble d'antenne... Faites appel aux compétences d'un radioamateur, et... bonne chasse aux météores !

#### Petit problème

### La date de Pâques 2019

On entend souvent dire que Pâques a lieu le 1er dimanche qui suit la pleine Lune qui suit l'équinoxe de printemps.

En 2019, l'équinoxe aura lieu le 20 mars, la pleine Lune le jeudi 21 mars et le dimanche qui suit est le 24 mars. Pourtant, les calendriers donnent pour Pâques la date du 21 avril. Où est l'erreur ?

## L'observatoire d'Arecibo

Frédéric Pitout, observatoire Midi-Pyrénées,  
Institut de recherche en astrophysique et planétologie, Toulouse.

*Petit survol d'un grand de la radioastronomie, connu aussi pour avoir envoyé le premier message aux extraterrestres.*

**L**e radiotélescope d'Arecibo est un morceau d'histoire, presque une star à lui tout seul dans le monde de l'astronomie et bien au-delà. Nous avons tous déjà vu dans un film, une série télé, un documentaire ou même un jeu vidéo cette immense antenne radio lovée dans le creux d'un effondrement géologique. Retour sur une icône.

### Avant tout un radar

Mis en service en 1963, le radiotélescope d'Arecibo possède un miroir primaire de 305 m de diamètre. Il se trouve dans la partie ouest de l'île de Porto Rico, près de la commune d'Arecibo et constitue l'unique instrument de l'observatoire dont le nom officiel est National Astronomy and Ionosphere Center (NAIC). Il faut savoir que cet instrument est un radar avant d'être un radiotélescope. Alors qu'un radiotélescope se contente de recevoir les ondes radio émises par des sources naturelles (planètes, pulsars, etc.), un

radar est actif : il émet une onde électromagnétique dans le domaine radio et observe le signal renvoyé (rétrodiffusé pour être précis) par la cible. En effet, dans les années 1960, son concepteur William Gordon de l'université de Cornell avait une idée bien précise en tête : l'étude de l'ionosphère, la partie partiellement ionisée de la haute atmosphère (au-dessus de 70 km). En vertu de la théorie de la diffusion dite incohérente, on émet une onde radio vers l'atmosphère et à partir des propriétés du signal rétrodiffusé par les électrons libres de l'ionosphère, on déduit des paramètres comme la concentration électronique, les températures électroniques et ioniques, ainsi qu'une composante de la vitesse ionique.

Évidemment, un système actif peut facilement se transformer en système passif comme un « vulgaire » radiotélescope.



*Fig.1. Antenne de l'Observatoire d'Arecibo (avec l'aimable autorisation de l'Observatoire d'Arecibo, un établissement de la NSF).*

## Un choix technique particulier

Étant donné sa taille, il n'était pas question de pouvoir pointer à volonté l'antenne d'Arecibo vers telle ou telle direction. En conséquence de quoi, elle n'est pas un paraboloïde comme la majeure partie des radiotélescopes ou des radars. Au lieu de cela, l'antenne a une forme sphérique, ce qui permet d'observer jusqu'à environ 15° autour de la direction du zénith en ajustant la position de la tête émettrice/réceptrice. L'autre contrepartie de cette sphéricité, c'est qu'il n'y a pas un point focal unique mais que les rayons convergent vers une ligne focale (en clair, Arecibo est astigmatique !). C'est la raison pour laquelle les ondes sont émises et reçues par une ligne d'émission/réception (line feed en anglais) de 36 m de long dont la position peut être ajustée selon la direction de pointage voulue (figure 2). Cette ligne d'émission émet et reçoit à la fréquence de 430 Mhz, et est utilisée pour l'étude de l'ionosphère.



*Fig.2. Suspendues à quelque 150 m de haut, les têtes d'émission/réception sur leur rail en arc de cercle. À gauche, la ligne d'émission/réception pointe vers le bas et à droite se trouve la demi-sphère du système grégorien (crédit T. Ulich).*

Pour le sondage radar de petits corps (astéroïdes) ou des planètes, ainsi que pour l'observation passive de sources radio astrophysiques, une plus grande précision de pointage est requise et c'est le système dit grégorien (Gregorian feed) qui est utilisé pour sélectionner les ondes qui arrivent à un point précis

sur la ligne focale et donc qui proviennent d'une direction plus précise. Ce système se trouve dans la demi-sphère visible sur la figure 2 et renferme les miroirs secondaire et tertiaire qui acheminent le signal radio vers les récepteurs. Il couvre une gamme de fréquences importante, de 300 MHz à 10 GHz.

## Quelques découvertes phares

Une des premières applications – en mode radar – fut de préciser la vitesse de rotation de Mercure. Elle fut mesurée en 1964 à 59 jours, alors que jusqu'alors, on pensait la planète en rotation synchrone (88 jours).

En 1968, Arecibo a permis d'observer un pulsar de période 33 ms dans la nébuleuse du crabe (M1), confortant ainsi l'existence d'un objet qui n'était alors qu'hypothétique, les étoiles à neutrons en rotation rapide. Cette découverte a accredité la thèse de la fin de vie cataclysmique des étoiles massives en supernovæ puis étoiles à neutrons.

En 1972, Russell Hulse et Joseph Taylor découvrent le premier pulsar binaire (PSR B1913+16), ce qui leur vaudra le prix Nobel de physique en 1993.

En 1990, Aleksander Wolszczan découvre le pulsar PSR B1257+12 autour duquel il découvrira deux ans plus tard trois planètes (bizarrement, c'est la découverte d'une planète géante autour de l'étoile Peg 51 par Michel Mayor et Didier Queloz qui reste dans les annales comme la première découverte d'exoplanète ; probablement parce que Peg 51 ressemble plus à notre étoile qu'un pulsar).

## Aujourd'hui

Depuis 2011, l'observatoire d'Arecibo est géré par un consortium d'universités sous la houlette de l'agence scientifique nationale américaine, la NSF. Son temps d'observation est dédié pour 20 % aux études ionosphériques (en mode radar) et 80 % à la radioastronomie. L'antenne d'Arecibo était la plus grande au monde jusqu'en 2016 et la mise en service du radio télescope géant chinois FAST (500 m de diamètre). ■

### La radioastronomie sur le site du CLEA

#### Dans les anciens numéros des Cahiers Clairaut ([clea-astro.eu/archives](http://clea-astro.eu/archives)).

Codage et décodage d'un message aux extraterrestres (Avec nos élèves), n°157 (2017)

ALMA, grand réseau millimétrique d'Atacama (Reportage), n° 153 (2016)

Le grand radiotélescope de Nançay a 50 ans (Histoire), n° 153 (2016)

Histoire de la radioastronomie en France 1901-1980 (Histoire), n° 149 (2015)

Radioastronomie solaire (Avec nos élèves), n° 84 (1998)

Les radio planètes (Article de fond), n° 50, 1990.

Les noyaux actifs de galaxies (Article de fond), n° 47 (1989)

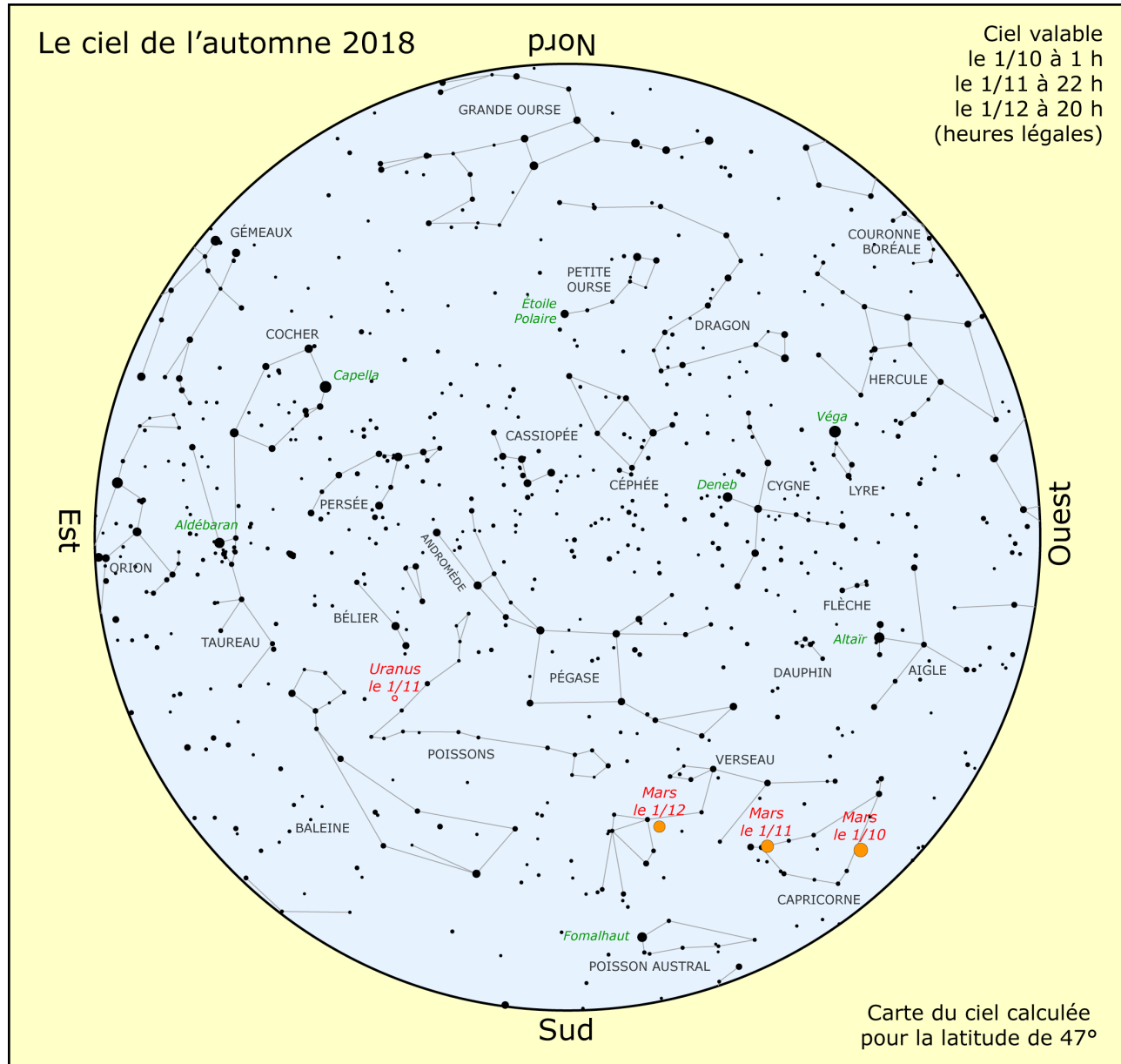
Les quasars aujourd'hui (article de fond), n° 41 (1988)

(tous les numéros de plus de 3 ans sont en libre accès, les numéros plus récents sont réservés aux abonnés numériques).

#### Sur LUNAP ([clea-astro.eu/lunap](http://clea-astro.eu/lunap))

Notions en bref et compléments à l'onglet Radioastronomie (histoire, régions III, raie à 21 cm, les radiotélescopes, résultats).

# OBSERVATION



## Visibilité des planètes

**Mercury** pourra être recherchée le matin mi-décembre. Conjonction avec Jupiter le 21 à l'horizon sud-est ( $0,8^\circ$ ).

**Venus** passe en conjonction inférieure le 26 octobre (elle se trouve alors entre le Soleil et la Terre). On la retrouve en décembre le matin, très lumineuse et en croissant.

Après son opposition fin juillet, **Mars** continue à être observable le soir mais son éclat diminue et sa distance augmente.

**Jupiter** passe derrière le Soleil le 26 novembre. On peut encore la voir le soir jusqu'à mi-octobre et on la retrouve le matin en décembre.

**Saturne** est encore observable le soir jusqu'en novembre, elle passera derrière le Soleil le 2 janvier.

**Uranus** se trouve dans les Poissons.

## Quelques événements (heures légales)

22/09 : équinoxe d'automne à 3 h 53 min.

9/10 : maximum des Draconides (étoiles filantes).

21/10 : maximum des Orionides (étoiles filantes).

24/10 : opposition d'Uranus.

11/11 (soir) : rapprochement Lune Saturne ( $1,5^\circ$ ).

17/11 : maximum des Léonides (étoiles filantes).

7/12 (soir) : Mars et Neptune très proches ( $<5'$ ).

14/12 : maximum des Géminides (étoiles filantes).

21/12 (matin) : rapprochement Mercure Jupiter ( $0,8^\circ$ ).

21/12 : solstice de décembre à 23 h 22 min.

Et bientôt, une éclipse de Lune (le 21 janvier au matin).

## Lune

Pleine Lune : les 25/09, 24/10, 23/11.

Nouvelle Lune : les 9/10, 7/11, 7/12.

# AVEC NOS ÉLÈVES

## Aux portes de l'espace

Léo Hauser et al.

*Un ambitieux projet conçu et réalisé par des élèves suisses dans le cadre de leur scolarité. L'envoi d'un ballon sonde équipé d'une nacelle contenant des instruments scientifiques permettant de mesurer : la température, la pression atmosphérique, la radioactivité, l'altitude et des données gyroscopiques.*

*Léo Hauser a rédigé ce texte d'après le projet réalisé par Noah Stegmüller, Mario Trieu, Gianni Verillo, Wassim Chedli et Léo Hauser sous la supervision de M. Philippe Drompt, enseignant au Gymnase français de Bienne, dans le cadre de leur travail de maturité.*

### Le projet

Cinq élèves du Gymnase français de Bienne, dans le cadre de leur travail de maturité<sup>1</sup>, se sont lancés comme projet d'envoyer, presque aux portes de l'espace, une nacelle autonome reliée à un ballon capable d'effectuer des relevés scientifiques et également de prendre des images du vol depuis le sol jusqu'à la stratosphère. Il s'agit d'une réelle aventure dans laquelle chaque élément utilisé a été conçu, programmé et testé par les élèves dans les conditions que pourrait rencontrer l'engin.



*Fig.1. Lâcher du ballon le 22 juin 2016 au bord du lac de Bienne.*

L'appareillage a été placé dans une nacelle qui a rencontré un milieu relativement hostile, avec entre autres une température très basse, de l'ordre de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , une pression presque nulle ou encore un taux de radiations supérieur à 30 fois celui rencontré au sol. Le système électronique devait donc être adapté à un tel voyage et fonctionnel du premier coup.

La nacelle contenant les capteurs et autres instruments, d'un poids de 1,2 kg, a été soulevée par un ballon en latex, rempli à l'hélium, d'un diamètre d'environ 2 mètres au sol. Ils étaient tous deux reliés

<sup>1</sup> Équivalent d'un travail de fin de baccalauréat.

par une ficelle, d'une vingtaine de mètres, équipée d'un parachute pour amortir la chute de la nacelle après l'éclatement du ballon à environ 30 000 mètres d'altitude. À titre de comparaison, un avion de ligne vole à une altitude de croisière de l'ordre de 10 km.

Son diamètre augmente au fur et à mesure de sa montée, en raison de la diminution de la pression atmosphérique, pour atteindre la dimension respectable de dix mètres lorsqu'il arrive dans la stratosphère. Évidemment, le latex dont il est constitué ne résiste pas à cette extension et il éclate.

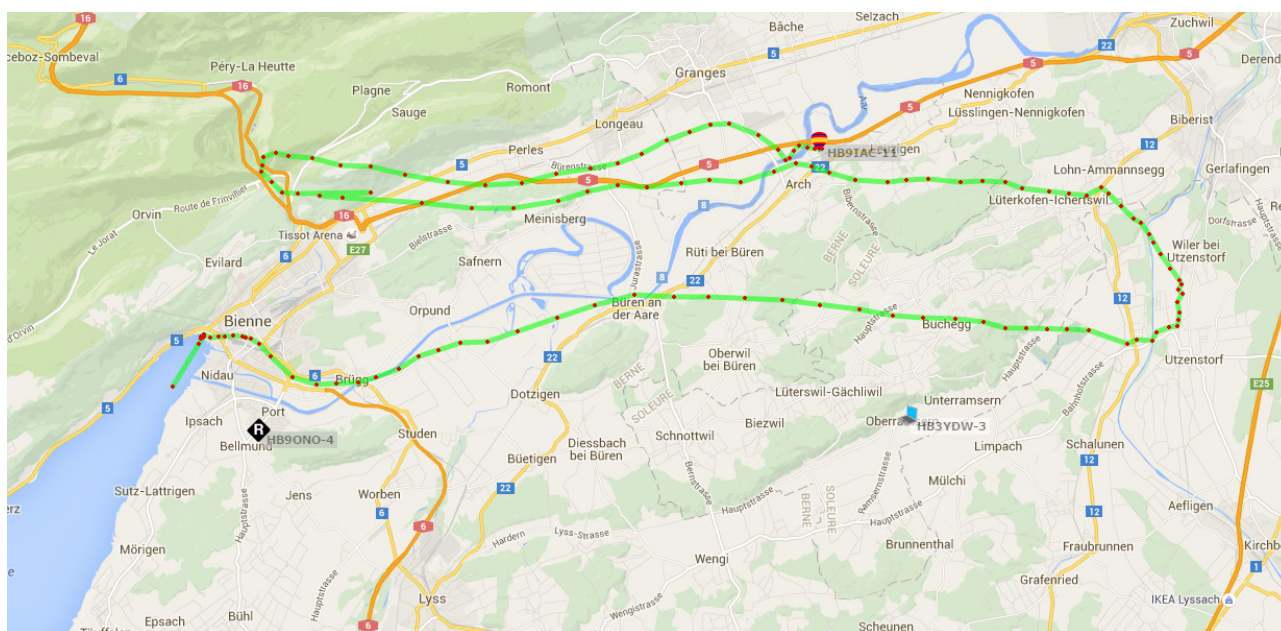


*Fig.2. Le ballon quelques secondes après son lâcher.*

### Le vol du ballon

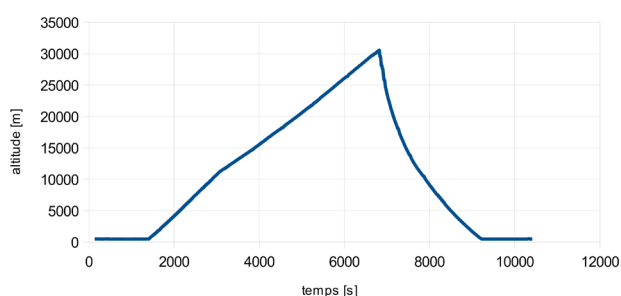
Le lâcher du ballon s'est déroulé le 22 juin 2016 en raison des excellentes conditions météorologiques de cette journée. En effet, le vent et plus particulièrement les courants d'altitude jouent un rôle crucial pour la réussite de l'expérience, car à une telle altitude le ballon peut sans problème être transporté jusque dans un pays voisin. Ce jour-là, le ballon a pu être récupéré à seulement 15 km du lieu de départ, à Arch.

La carte (cf figure 3 sur la page suivante) montre le trajet du ballon en deux dimensions, qui a pu être dessiné grâce aux données recueillies par le GPS embarqué durant le vol.



**Fig.3.** Le trajet du ballon en 2D (en vert). Les positions enregistrées sont symbolisées par les points rouges.

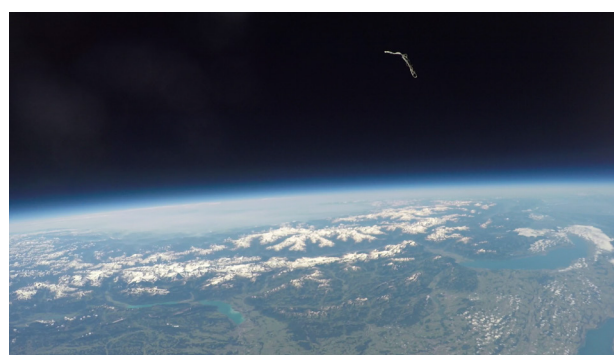
Les mesures d'altitude, effectuées par le GPS toutes les 10 secondes, montrent que le ballon a effectué une montée très régulière. À 30 500 m, le ballon a éclaté et il est retombé en chute libre jusqu'à ce que le parachute rencontre une densité d'air suffisante pour se gonfler et freiner la descente, d'où la diminution progressive de la vitesse de chute que nous pouvons constater sur le graphique ci-dessous.



**Fig.4.** Graphique représentant l'altitude [m] en fonction du temps [s].

En analysant la montée de la courbe, représentant l'altitude en fonction du temps, nous pouvons constater qu'elle est relativement linéaire. La vitesse moyenne lors de l'ascension était de 6,502 m/s selon les mesures enregistrées par le GPS. Mais nous pouvons aussi constater que la courbe progresse un peu plus rapidement durant les 11 000 premiers mètres, pour finalement diminuer son rythme d'ascension. Ce phénomène peut être expliqué par les courants thermiques ascendants. Le ballon a fini par éclater à l'altitude précise de 30 549 m, comme l'illustre la photo prise juste après l'éclatement par la caméra embarquée.

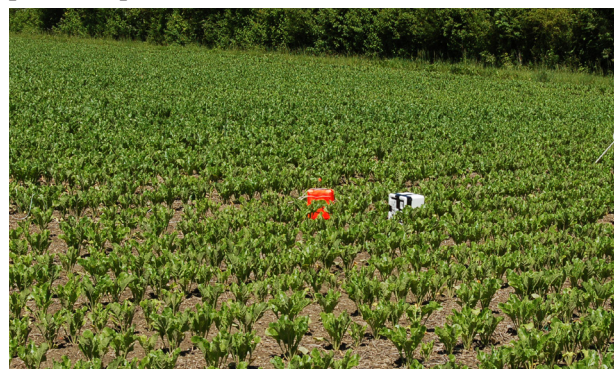
Pendant la chute de la nacelle, d'une durée de 40 minutes, un module GSM était programmé pour



**Fig.5.** Éclatement du ballon.

envoyer un SMS contenant les coordonnées GPS de la nacelle pour nous permettre de la récupérer. Un nouveau message était envoyé toutes les 40 secondes pour permettre un suivi de la chute. Pour économiser de l'énergie, ils n'étaient envoyés que lorsque le ballon avait atteint une altitude inférieure à 2 000 m d'altitude, l'envoi d'un SMS pouvant utiliser un courant allant jusqu'à 1 A.

La nacelle a finalement été récupérée totalement intacte, avec à son bord toutes les mesures effectuées par les capteurs.



**Fig.6.** La nacelle juste avant d'être récupérée.



## Les mesures pendant le vol

Le but principal de ce projet était l'étude des aspects physiques de notre atmosphère. Le système électronique embarqué était totalement autonome, le tout étant commandé par un microcontrôleur Arduino® MEGA, qui s'occupait de faire fonctionner tous les capteurs grâce à un algorithme que nous avons créé. Voici la liste des types de mesure qui ont été relevés durant le vol :

- la température ;
- la pression atmosphérique ;
- la radioactivité ;
- l'altitude/position de la nacelle ;
- données gyroscopiques.

Chaque type de mesure a été réalisé par un capteur spécifique. L'illustration ci-dessous montre le microcontrôleur relié aux différents capteurs, le tout devant être le plus compact et résistant possible.

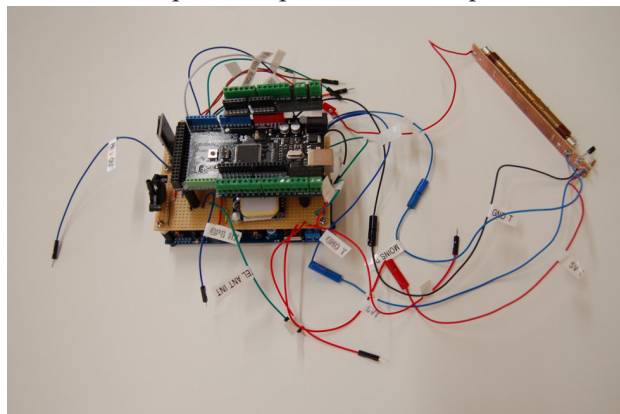


Fig.7. Le système électronique complet hors de la nacelle.

## Le compteur Geiger

Le capteur utilisé pour le vol a été choisi en fonction des circonstances auxquelles il devra faire face. Il ne faut pas oublier que l'atmosphère est un milieu relativement hostile et il ne faut surtout pas négliger que le rayonnement mesuré en haute altitude n'est pas de même intensité que celui que nous trouvons au sol. Le capteur qui a pu répondre à toutes ces exigences à un prix très raisonnable est le : « Geiger Counter Radiation Detector ver.3 ». D'une part, il fournit au tube Geiger une tension de 400 V et d'autre part, il utilise un courant faible allant de 30 à 60  $\mu$ A. Ce capteur possède également une bonne précision de détection et une fiabilité d'environ 1 mSv/h.

Le tube Geiger (SBM 20), capable de détecter les rayonnements bêta et gamma, est un cylindre métallique rempli d'un gaz à basse pression isolant (néon, vapeur de brome et argon). À l'intérieur du tube se trouve une électrode sous forme d'un

fil métallique, aussi appelée anode, tandis que la cathode longe la paroi du tube et représente la borne négative. En principe, quand le capteur est au repos, aucun courant ne circule entre la cathode et l'anode.

Mais lorsqu'une particule ionisante traverse le tube, elle arrache un ou plusieurs électrons appartenant aux atomes du milieu gazeux. Le gaz devient ainsi conducteur pendant un court instant. Ce phénomène a pour effet de faire passer un courant entre les deux électrodes. Les données sont ensuite envoyées au microcontrôleur Arduino qui comptera le nombre de coups reçus.

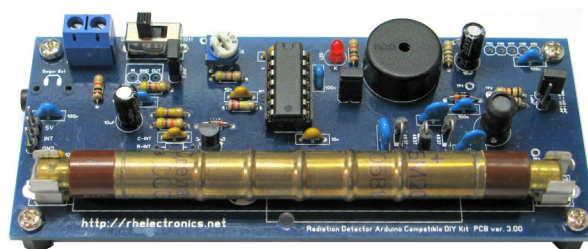


Fig.8. Le compteur Geiger utilisé pour les mesures  
Source : <http://www.rhelectronics.net>.

L'algorithme utilisé pour travailler avec ce compteur Geiger est relativement simple. Pour le microcontrôleur il s'agit « d'écouter » le compteur Geiger pendant 10 secondes et d'incrémenter une unité à une variable chaque fois qu'un rayonnement est détecté par le tube. La variable est tout d'abord enregistrée puis remise à zéro au début de chaque cycle. Le fonctionnement du code faisant fonctionner tous les capteurs, bien que plus complexe, est toujours basé sur ce système de cycle de 10 secondes. Cette durée a été choisie pour rendre l'analyse des données de vol plus aisée.

## La température

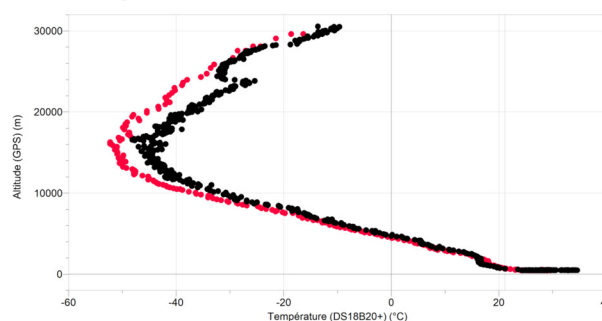


Fig.9. Graphique représentant l'altitude [m]  
en fonction de la température [°C].

Le graphique ci-dessus présente les températures recueillies durant le vol, les points noirs représentant les mesures lors de l'ascension et les rouges celles de la descente.

À première vue, nous pouvons déjà observer que le capteur a pris moins de mesures à la descente qu'à la montée. Ceci vient du fait que la vitesse verticale du ballon était plus importante en descente qu'en montée. Le capteur avait donc moins de temps à disposition pour prendre ces valeurs. Nous pouvons donc imaginer que les valeurs prises lors de la montée sont plus précises. Le décalage de température entre la montée et la descente vient probablement d'un changement de température de l'atmosphère entre l'ascension et la chute de la nacelle.

### De 500 à 10 000 mètres

L'altitude de 500 m correspond au lâcher du ballon. La température diminue presque linéairement avec l'altitude dans cet intervalle. Plusieurs facteurs sont la cause de ce phénomène. Pour commencer, la Terre absorbe une bonne partie de l'énergie solaire, cela réchauffe la surface terrestre. Il est donc sensé de dire que plus nous nous éloignons de la chaleur rayonnée par la Terre plus la température va diminuer. Une autre raison importante est la propriété des gaz. En effet, lorsqu'un volume d'air se dilate, il a tendance à se refroidir. À 10 000 m d'altitude, la température était déjà de  $-30,75\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sachant qu'elle dépassait les  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  au sol.

### De 10 000 à 20 000 mètres

Nous observerons qu'à partir de 10 000 m, la température diminue de moins en moins rapidement, jusqu'à ce que nous arrivions à une température presque constante, entre 12 000 et 18 000 m environ. Après cela, elle recommence à augmenter.

La stratosphère commence aux alentours de 10 000 m. Elle comporte la couche d'ozone qui débute à environ 20 000 m, cette couche a la caractéristique d'absorber une grande partie des radiations provenant du rayonnement ultraviolet du Soleil, ce qui va engendrer un réchauffement. Le bas de la stratosphère est en équilibre entre la chaleur transmise par la couche d'ozone et celle absorbée par la troposphère, la troposphère étant la première partie de l'atmosphère (0 à 10 000 m).

### De 20 000 à 30 000 mètres

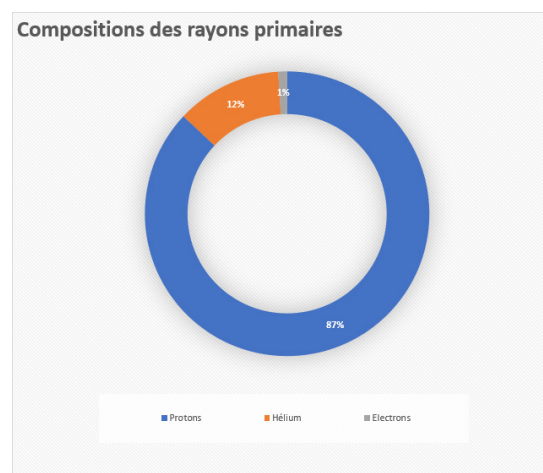
La température va augmenter aux alentours des 20 000 m. Dans cette plage d'altitude, nous nous trouvons en pleine couche d'ozone, qui a la particularité de chauffer. La température a atteint  $-9,63\text{ }^{\circ}\text{C}$  juste avant l'éclatement du ballon.



Fig.10. Vue prise par la caméra à 30 km d'altitude sur le plateau suisse et les Alpes.

### La radioactivité dans l'atmosphère

L'intérêt premier de mesurer la radioactivité dans l'atmosphère est l'étude des rayonnements cosmiques. Ils sont constitués de particules ultra-énergétiques, pouvant atteindre  $10^{20}\text{ eV}$ . Ils proviennent de l'espace interstellaire et intergalactique et sont composés majoritairement de protons.



Lorsqu'ils pénètrent dans l'atmosphère, ils bombardent les noyaux d'azote et d'oxygène et produisent une gerbe de particules secondaires. Celles-ci reçoivent une partie de l'énergie des rayons primaires et entrent en collision avec d'autres noyaux pour créer à leur tour d'autres particules et ainsi de suite jusqu'à la surface de la Terre.

De ce fait, le nombre de particules va croître dans les moyennes altitudes, mais leur énergie diminuera progressivement en raison de leur absorption par les molécules toujours plus denses. Cela dit, le rayonnement cosmique a une très faible probabilité d'atteindre le sol. En basse altitude les particules sont très lentes. Ces dernières sont essentiellement composées de muons et de photons. La pression atmosphérique joue également un rôle dans le freinage des particules traversant l'atmosphère.

Le graphique ci-après donne une belle représentation des mesures effectuées par le compteur Geiger embarqué. Dans la première partie (A), allant de 31 km à 23 km, le taux de radioactivité augmente progressivement passant de 81 à 101 daBq. Les particules se trouvant dans cette tranche sont partiellement constituées de protons issus du rayonnement primaire. Il y a également formation de gerbes secondaires. Par conséquent, le nombre de particules radioactives augmente, ce qui peut expliquer la croissance du taux de radioactivité.

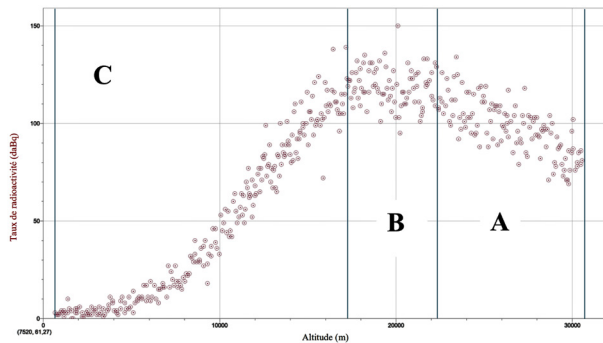


Fig.11. Graphique représentant le taux de radioactivité [daBq] en fonction de l'altitude [m].

Dans la seconde partie (B), le taux se stabilise légèrement entre 22 et 18 km. La courbe atteint son maximum à 20 km d'altitude, pour un taux de

150 daBq. Nous y trouvons un équilibre entre les particules nouvellement créées et celles retenues par les molécules de l'air. Finalement, durant la dernière partie (C), le taux de radioactivité connaît une nette décroissance. Nous parlons dans ce cas d'une absorption atmosphérique. Les particules n'ont plus assez d'énergie pour entrer en collision avec les molécules atmosphériques qui sont toujours plus denses. La pression atmosphérique augmente dans les basses altitudes et les particules radioactives vont être progressivement freinées et réduites à néant. Seuls les muons et d'autres particules partiellement énergiques pourront atteindre la surface de la Terre.

### Pour conclure

Malgré les quelques inévitables difficultés, je pense que le groupe et moi-même pouvons être extrêmement satisfaits du travail accompli. La nacelle était certes préparée à un vol stratosphérique, mais dès lors que le ballon avait quitté le sol, nous n'étions plus maîtres de quoi que ce soit. Je pense que ce travail de maturité a été particulièrement enrichissant, par l'interdisciplinarité qu'il proposait et cela a été vraiment gratifiant de voir que ce travail de longue haleine a pu porter ses fruits et ouvrir de nouvelles perspectives d'étude. ■

### Mots croisés radioastronomie

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1									
2								■	
3		■			■				
4						■			
5		■							
6			■						■
7						■		■	
8	■				■				
9					■		■		
10									
11						■			

#### Horizontalement

- Unité pour radioastronomie métrique.
- Radiotélescope.
- Comme le télescope Hubble. Soleil égyptien.
- Unité électromagnétique. Salut.
- Âges de la Lune au 1<sup>er</sup> janvier.
- Initiales de la ville où se tiendra la prochaine AG du CLEA. Habitats indiens.
- Il constituera le plus grand radiotélescope du monde.
- $IX \times XI + II$ . Il peut être mortel.
- Antenne radio. 85 au Col Bayard.
- Celles du Soleil peuvent perturber les signaux radios.
- Ancienne DGSE. Arbre indien.

#### Verticalement

- C'est lui qui a imaginé les ondes radio. Are we in autumn?
- n° 68. Il fut un des pères de la radioastronomie française et son petit fils s'occupe de Mars.
- Elle est constituée de particules et créée par un rayon cosmique. Fruit ou gâteau.
- Se dit d'accord. Oiseau dans le désordre.
- Région qui émet à 21 cm. Aboier comme un chevreuil. Équerre.
- Ministre japonais la tête en bas. Classe. Géné.
- La radioastronomie permet d'observer celle de la Galaxie. Pour informer le vacancier.
- Un peu en forme d'ellipses. Boîte.
- Radiative et convective sur le Soleil. Capitale biélorusse.

Solution p. 37

## Concordia – Dôme C (2<sup>e</sup> partie) un ciel d'une qualité extraordinaire

Isabelle VAUGLIN, CRAL – Observatoire de Lyon, 69230 Saint-Genis-Laval  
Membre du Comité National Français des Recherches Arctiques et Antarctiques (CNFRA)  
Représentante française dans le groupe des sciences physiques du Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR)

*Il s'agit de la suite de l'article paru dans le numéro 162 des Cahiers Clairaut. L'auteur décrit la variété des instruments installés sur le site et les résultats déjà obtenus.*

### Exploitation de Concordia

À côté des activités scientifiques en glaciologie, sismologie, science de l'atmosphère, plusieurs instruments astronomiques ont été installés sur la base, en grande partie développés par les astronomes de l'observatoire de la Côte d'Azur à Nice :

- BRAIN, interféromètre bolométrique pour étudier le fond diffus cosmologique ;
- Cochise pour la cosmologie en submillimétrique et millimétrique ;
- Givre, pour évaluer les conditions d'apparition du givre sur les optiques des télescopes et l'éliminer ;
- la plateforme Concordiastro qui accueille la plupart des instruments destinés à la caractérisation de l'atmosphère : seeing, temps de cohérence, angle

d'isoplanétisme, taux de scintillation ;

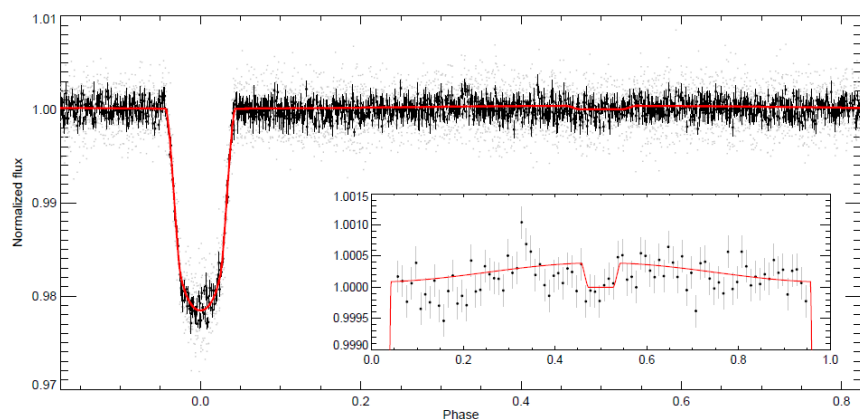
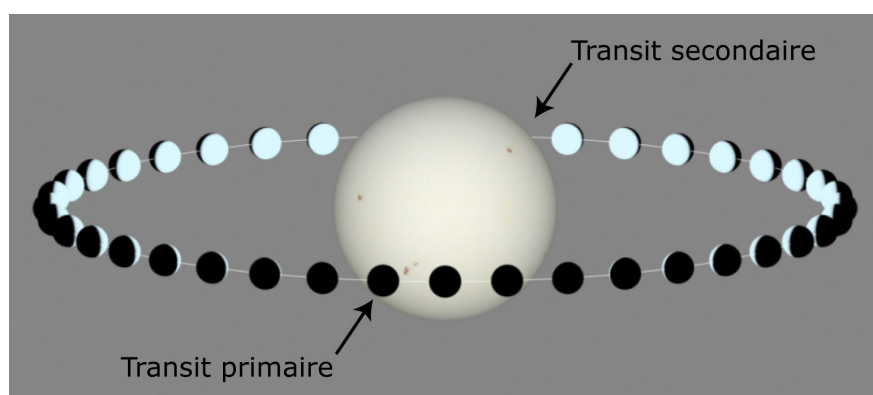
- IRAIT, télescope infrarouge italien de 80 cm de diamètre de l'université de Perugia (Pérouse) ;
- PAIX, photomètre multi-couleur du proche UV au proche IR construit par Merieme Chadid de l'observatoire de la Côte d'Azur. Monté sur un télescope Cassegrain de 40 cm avec un champ de vue de  $12' \times 8'$  et totalement robotisé depuis 2013, il est capable de fonctionner jusqu'à  $-80\text{ °C}$ . PAIX permet d'étudier les pulsations stellaires et leur évolution en observant en continu sans interruption pendant plus de 150 nuits. Par le logiciel PACS, le photomètre est commandé et contrôlé depuis Nice pour faire les observations à distance ;
- ASTEP, télescope de 40 cm pour la recherche des exoplanètes par la méthode des transits (figure 9).



**Fig.9.** À côté de la plateforme Concordiastro, le télescope ASTEP – un télescope de Newton de 400 mm de diamètre avec un champ de vue de 1 degré carré. Largement automatisé, ASTEP est pointé en continu sur  $\beta$  Pic depuis mars 2017 afin d'y détecter un éventuel transit de l'exoplanète  $\beta$  Pic b (photo Djamel Mekarnia, OCA).

Construit et exploité par l'équipe de Djamel Mekarnia et Tristan Guillot du laboratoire Lagrange de l'observatoire de la Côte d'Azur, ASTEP (Antarctic Search for Transiting Extrasolar Planets) est un télescope automatique de 40 cm dédié à la recherche de transits planétaires depuis le Dôme C. Le site réunit en effet plusieurs atouts majeurs pour la recherche d'exoplanètes en transit depuis la Terre : une nuit continue de plus de 3 mois pendant l'hiver austral, quasiment sans nuage et sans précipitation, la possibilité d'observer des champs d'étoiles avec peu de variations de masse d'air et une scintillation très faible qui permet une très grande précision photométrique. ASTEP a fonctionné entre 2010 et 2014 et son premier résultat significatif a été la

détection du transit secondaire (passage de la planète derrière son étoile, appelé aussi occultation) de l'exoplanète WASP-19b, déjà connue. Ce résultat a montré la puissance d'ASTEP-400 car les transits secondaires sont très difficiles à observer depuis le sol. De mars à octobre 2017, le télescope a pointé exclusivement l'étoile  $\beta$  Pic, de type spectral A5V, une étoile très jeune d'environ 20 millions d'années, variable de type  $\delta$  Scuti. En 1983, le satellite infrarouge IRAS avait détecté un important excès infrarouge dû à un disque de débris vu par la tranche dès 1984.  $\beta$  Pic illustre la phase finale de formation des systèmes planétaires, avec un bombardement cométaire intense sur l'étoile.



*Fig.10. Transit et occultation de WASP-19b observés par ASTEP (Abe et al., A&A 553 en 2013). La courbe de luminosité de l'étoile (en bas) montre une diminution de flux de plus de 2 % correspondant au transit primaire et une très légère variation (< 0,1 %) à la phase 0,5 correspondant au transit secondaire ou occultation.*

*En haut, schéma de l'« effet de phase », présent dans les données, cohérent avec une orbite circulaire de la planète autour de l'étoile.*

En 2008, en imagerie avec l'instrument NaCo sur le VLT, A.M. Lagrange découvre  $\beta$  Pic b, une exoplanète de 10 fois la masse de Jupiter à 8 ua de son étoile, de période orbitale environ 20 ans. Cette découverte a donné l'explication de la mystérieuse baisse de luminosité de  $\beta$  Pic observée le 10 novembre 1981 : c'était très probablement l'observation du transit de la planète  $\beta$  Pic b devant son étoile.

Comme en 1981, la planète  $\beta$  Pic b devait repasser devant son étoile (ou presque) entre avril 2017 et janvier 2018, opportunité ne se reproduisant pas avant 18 ou 36 années. Il fallait bien sûr des observations

continues pendant toute la durée possible du transit afin de ne pas le rater ! Dans le cadre de la collaboration internationale qui s'est mise en place, la meilleure possibilité de détection était celle par ASTEP depuis Concordia ! Les données sont toujours en cours de traitement, mais une première analyse ne montre pas d'enregistrement d'un transit, la planète est peut-être passée un peu trop décalée de son étoile... Par contre, la grande précision photométrique des observations réalisées a permis de caractériser les pulsations de cette étoile de type  $\delta$  Scuti, jusqu'aux plus faibles : 31 fréquences de pulsation ont été détectées.

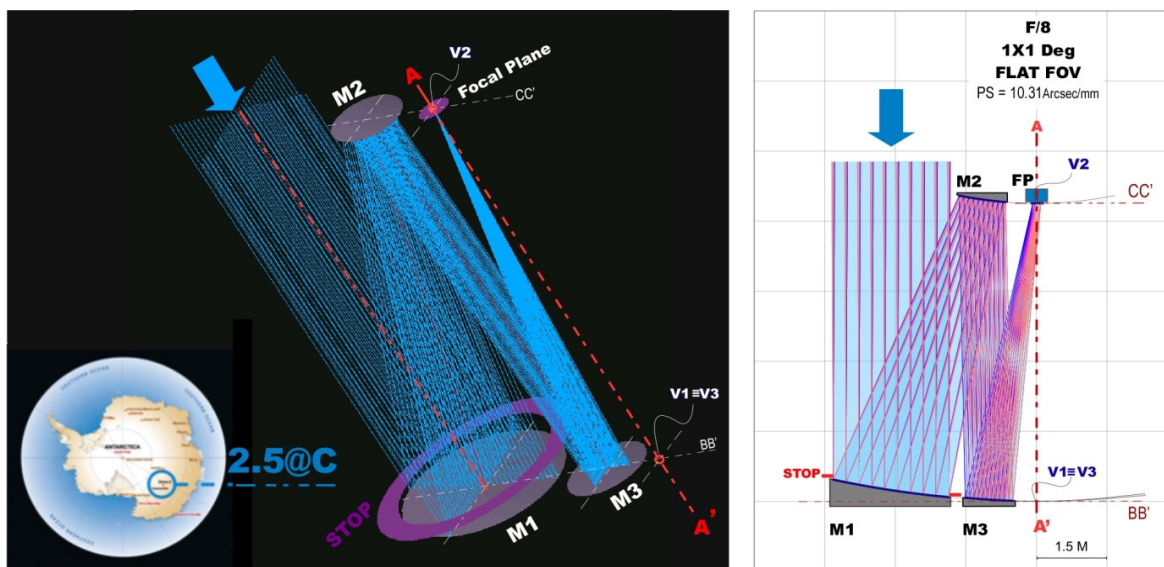
D'autres observations avec ASTEP sur quatre hivers successifs ont conduit Nicolas Crouzet et ses collègues à découvrir un couple d'étoiles naines binaires à éclipses de longue période (76 jours). Les périodes des systèmes binaires à éclipses détectés jusqu'à présent étaient toujours inférieures à une dizaine de jours. Il fallait des observations continues pendant les quatre mois d'hiver austral, et les conditions météo excellentes du Dôme C pour pouvoir détecter des objets variables à si longue période.

Le projet ASTEP+ est de construire maintenant un instrument totalement robotisé et optimisé, capable d'atteindre une précision photométrique encore meilleure. ASTEP+ est prévu pour être opérationnel à Concordia en 2019. Il pourra être utilisé aussi pour faire le suivi des candidats exoplanètes découverts par le satellite TESS lancé par la NASA en avril 2018.

## Projet d'un télescope de 2,5 m de diamètre

Pour tirer le meilleur profit des conditions atmosphériques exceptionnelles, nous avons proposé un télescope hors-axe de classe intermédiaire (*Polar Large Telescope, PLT*, de 2,5 m) infrarouge (de  $0,8 \mu\text{m}$  à  $5 \mu\text{m}$ ), à haute résolution angulaire ( $\approx 0,3''$  en GLAO, *Ground Layer Adaptive Optics*) et grand champ ( $0,5^\circ$  en diamètre). Les sujets scientifiques de PLT étaient focalisés sur les domaines d'excellence du Dôme C, à savoir l'imagerie et la spectro-imagerie profonde et à haute résolution angulaire en infrarouge entre  $2,2$  et  $5 \mu\text{m}$ . Ce domaine spectral n'a jamais été exploré simultanément à grand champ et en haute résolution angulaire.

Un premier concept optique menée par Gil Moretto a montré que pour exploiter au mieux les qualités du site du Dôme C, un télescope hors-axe était de loin le plus performant car il donne une pupille « propre »



**Fig.11.** Conception optique du télescope PLT infrarouge hors-axe de 2,5 m, grand champ (@Gil Moretto) ; sans obstruction centrale, la pupille est propre et elle donne un télescope de grande dynamique pour la photométrie. Un design à 3 miroirs permet un champ de  $1^\circ \times 1^\circ$ .

donc une faible lumière diffusée, une faible émissivité et permet un grand champ de vue.

Réduire les sources d'émission thermique propres est un must pour l'astronomie infrarouge et minimiser la lumière diffusée offre un bien meilleur contraste et permet d'observer une part plus importante du champ, là où les télescopes classiques sont aveugles à cause de la lumière diffusée par l'araignée du secondaire. C'est aussi un avantage considérable pour la détection des exoplanètes, très peu lumineuses à côté des étoiles brillantes et des faibles nébulosités autour des étoiles jeunes, là où les planètes peuvent se former.

Le caractère particulier de la couche de turbulence d'épaisseur très limitée au-dessus de Concordia fait aussi que les techniques d'optique adaptative particulières (*Ground Layer Adaptive Optics, GLAO*) pourraient être extrêmement efficaces et fournir des résultats remarquables.

Nous avons soumis à l'ANR le projet « ANGISS : Assessment of a New Generation of Infrared Sky Survey for the E-ELT and EUCLID era », hélas non financé. Le télescope PLT serait équipé d'une caméra infrarouge  $2,5-5 \mu\text{m}$  à refroidissement passif, haute résolution angulaire grâce à la GLAO.

Il sera focalisé sur le domaine d'excellence du Dôme C, à savoir l'imagerie et la spectro-imagerie profonde et à haute résolution angulaire en infrarouge entre 2,3 et 5  $\mu\text{m}$ . Ce domaine spectral n'a jamais été exploré simultanément à grand champ et en haute résolution angulaire. PLT permettra la caractérisation des objets très lointains (galaxies à grand  $z$ ), des objets très obscurcis (MIS dense, populations stellaires extrêmes, SN Ia) et des objets très froids (étoiles de type T, exo-planètes). Ce programme n'est réalisable au sol que dans les conditions très particulières du Dôme C. PLT sera l'instrument le plus performant jamais réalisé dans ce domaine et permettra d'effectuer de longues séries temporelles pour suivre les étoiles variables de tout type, les phénomènes transitoires, les pulsation stellaires (astérosismologie).

## Difficultés

Les sites polaires présentent évidemment des inconvénients tels que les difficultés d'accès, les capacités réduites de construction d'instruments lourds, l'approvisionnement limité en énergie, l'isolement, les difficultés du travail extérieur hivernal et les communications limitées. Les stations en activité ont montré qu'aucun n'est, en fait, insurmontable puisque plusieurs d'entre elles et notamment la station US Amundsen-Scott au pôle Sud a pu se doter d'instruments de grande dimension (ICE Cube pour la détection de neutrinos, SPT radiotélescope de 10 mètres d'ouverture pour l'étude du fond diffus cosmologique).

Même si, jusqu'à présent, la station Concordia s'est limitée à l'accueil de petits instruments, elle est la seule avec celle du pôle Sud à offrir des capacités d'hivernage aux astronomes. La station russe Vostok n'accueille pas d'instruments astronomiques et les autres stations en cours d'aménagement (Dôme A pour les Chinois et Dôme F pour les Japonais) ne sont pas encore équipées pour l'hivernage et ne le seront peut-être jamais. Ces derniers mois, les astronomes japonais ont d'ailleurs pris contact avec les astronomes français pour discuter d'une éventuelle collaboration au Dôme C. Ils semblent désormais abandonner l'idée d'une station permettant des hivernages à Dôme F, trop difficile à réaliser. Cela impliquerait d'ouvrir la station Concordia, purement franco-italienne jusqu'à présent, à l'international. L'IPEV doit donner son accord et veiller à faire respecter le savoir-faire acquis par sa longue expérience de travaux en milieux polaires, financée par les contribuables français et italiens !

La question de la pertinence du développement à Concordia d'instruments significativement plus

« grands » et plus coûteux que les précédents et ayant des objectifs scientifiques bien plus ambitieux a été longuement débattue dans les différents pays concernés (Australie avec le projet PILOT, Europe dans le réseau ARENA et PLT, Chine avec le projet KDUST). Aucun de ces projets n'a jusqu'à présent été en mesure de réunir le financement nécessaire, au-delà de phases de conception (phase A pour PILOT et PLT).

Il pourrait cependant y avoir un grand intérêt de la part des industriels et des PME à étudier, développer sous forme de R&D et mettre au point des technologies fortement robotisées et adaptées au fonctionnement dans des conditions polaires extrêmes.

Nous sommes convaincus que les propriétés extraordinaires de Concordia pour l'astronomie font qu'un jour ou l'autre, elles seront exploitées. Espérons que les Français seront capables d'en profiter, et dans un avenir pas trop lointain !

## Bibliographie

- *Planète blanche*, Jean Jouzel, Claude Lorius et Dominique Raynaud, ed. O. Jacob
- Aristidi et al., 2005, 2006 et 2009
- Chamberlin, 2000
- Site d'ASTEP : [astep.oca.eu/fr](http://astep.oca.eu/fr)
- Site de l'IPEV : <http://www.institut-polaire.fr/language/fr/>

### Solutions des mots croisés

#### Horizontalement

1. Mégahertz. 2. Arecibo. 3. RC (Ritchey-Chrétien). Aton. 4. Weber. Ave. 5. Épactes. 6. LR (La Rochelle). Tipis. 7. LOFAR (LOW Frequency ARray, ensemble d'interféromètres qui regroupera 50 000 antennes regroupées dans 48 stations, elles-mêmes réparties dans cinq pays européens). 8. CI (101). Ennui. 9. Yagi. RN. 10. Éruptions. 11. SDECE. Tek.

#### Verticalement

1. Maxwell. 2. Er (Erbium). Rocard (Yves et François). 3. Gerbe. Figue. 4. Accepta. Ipc (pic). 5. HI (hydrogène neutre). Raire. Té. 6. Eba (Shinzō Abe). CP. Nui. 7. Rotation. OT (Office de Tourisme). 8. Oves. Urne. 9. Zones. Minsk.

## L'école d'été du CLEA 2018

Marion Thomas et Isabelle Osterstock-Tournaire, stagiaires à l'EEA 2018

*Nous avons demandé à de nouveaux stagiaires de raconter leur première école d'été.*

### Une semaine « mouvementée »

Le stage a lieu au centre d'oxygénation du Col Bayard près de Gap à 1 200 mètres d'altitude.

À l'école d'été, on y mange très bien puisque nous sommes sustentés tels de grands sportifs. Ce ne sont pas les vaillants marcheurs du matin qui iront dire le contraire, car si vous voulez faire votre exercice quotidien et que vous avez le courage de vous lever aux aurores, alors un parcours de 5 km vous attend avec vue sur les montagnes et en compagnie des vaches. Réveil garanti !

Bien, et maintenant vous vous demandez ce que peuvent faire toutes ces personnes à une école d'été au lieu de profiter de leurs dernières semaines de vacances avant la rentrée. Serait-ce donc uniquement pour manger de la tarte aux myrtilles au milieu de golfeurs ?

Bien que cette explication ne semble pas totalement absurde lorsque l'on connaît la proportion de gourmands parmi les stagiaires, il existe bien heureusement une quantité d'autres motivations.

Tout d'abord vous pourrez rencontrer des personnes aux profils et aux personnalités variés. Que ce soit des professeurs des écoles, de collège, de lycée ou d'université. Ils enseignent aussi bien les sciences physiques, les mathématiques, les SVT et même le français. Certains travaillent dans l'animation, d'autres sont chercheurs. La liste ici est loin d'être exhaustive, mais c'est la diversité des profils qui fait la richesse de ce stage.

Embarqués dans la navette du CLEA qui file à toute vitesse vers les étoiles, vous êtes plongé dans les conférences ou les ateliers proposés par les animateurs. C'est avec étonnement qu'une fois de retour dans le monde réel vous regardez votre montre et vous rendez compte avec stupeur que c'est déjà fini. Rien d'étonnant à tout cela si en bon stagiaire vous avez suivi le cours sur la relativité. Les notions abordées en cours ont été diverses et se sont inscrites dans le thème de l'année : le mouvement. C'est ainsi que nous avons pu étudier à travers les cours, celui des planètes du Système solaire, de la Lune, du Soleil ou des galaxies.



*Le groupe de l'école d'été.*

*L'un des participants étant arrivé en retard, nous l'avons ajouté sur la photo, vous trouverez facilement lequel...*



Au cours d'ateliers présentés par les animateurs vous auriez pu par exemple, assembler des maquettes pour apprendre à repérer la position des planètes, fabriquer un spectroscope ou un cadran solaire. Pas de panique si vous n'êtes pas habile de vos mains, il y aura toujours un camarade prêt à faire vos découpes à votre place en échange de votre gâteau du dîner.



*Un atelier instruments anciens*

Si les travaux manuels ne sont vraiment pas votre tasse de thé, vous pourrez toujours vous diriger vers des ateliers utilisant des logiciels comme supports tels que GeoGebra où vous pourrez simuler l'orbite d'une planète ou bien Stellarium pour découvrir ce qui compose notre ciel. Si vous voulez à tout prix éviter l'informatique alors il restera toujours des ateliers où vous pourrez découvrir Kepler d'un point de vue historique, les constellations avec la mythologie ou bien la relativité à travers la science-fiction.

La liste est bien loin d'être exhaustive, mais les ateliers sont divers et s'adressent à tous en fonction des motivations personnelles ou professionnelles de chacun.

La météo n'a pas été de notre côté pendant ce séjour, mais nous avons pu observer les planètes que certains ont même pu photographier.

En étant plongé une semaine en immersion, on en apprend beaucoup, motivés par la curiosité, l'envie de progresser et de transmettre ses connaissances en matière d'astronomie. Le tout dans une ambiance studieuse, mais empreinte d'humour et de partage.

### **La journée découvertes et rencontres : un petit tour du côté de chez Auguste Le Van Suu**

L'Observatoire de Haute Provence a ouvert ses portes et reçu, façon VIP, les 42 participants et animateurs du stage d'été 2018 du CLEA. Nous sommes accueillis avec chaleur et convivialité par le directeur,

Auguste Le Van Suu ; la présentation de l'histoire du site et de ses projets en cours est fort instructive. Nous retiendrons deux points majeurs : la découverte de la première exoplanète en 1995, grâce au télescope de 193 cm et au spectrographe Elodie, a promu le site patrimoine historique de l'astronomie, tandis que l'expertise des chercheurs en fait un leader européen en spectrographie (détectant des vitesses radiales de l'ordre du mètre par seconde).

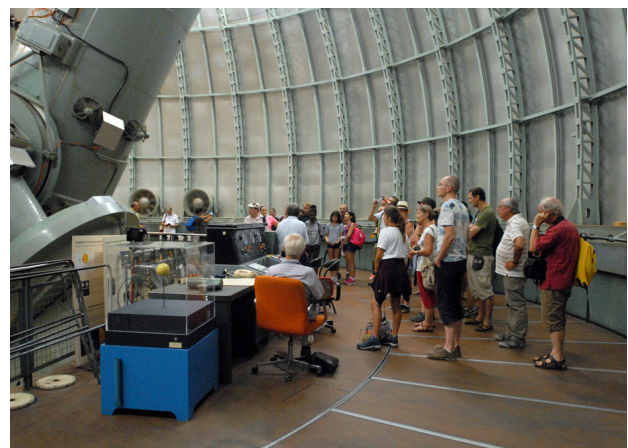
Au-delà de la recherche constante d'optimisation des outils d'observation et d'analyse, de nombreux projets tendant à diversifier les activités se développent, tels que la calibration des instruments, le centre R&D, la plateforme d'observation multithématique du sol et du ciel.



*De gauche à droite, Elodie, Auguste et Cécile.*

Place ensuite à la visite et à la rencontre avec Elodie, protégée jalousement dans son écrin de verre, tandis que son successeur, Sophie, plus sophistiquée et performante reste invisible. La fibre optique a apporté un énorme gain de précision et équipe désormais tous les spectrographes. Le must : la fibre octogonale.

À l'étage, sous sa coupole gigantesque, le télescope 193, immobile et grandiose, attend de nouvelles instructions pour se tourner vers le ciel. Il assure 280 jours d'observation par an. Respect.



*Visite dans la coupole du T193.*

Nous sommes tous impressionnés à l'idée du miroir de 193 cm et des optiques logés dans son tube.

Depuis la plateforme extérieure, nous pouvons compter jusqu'à 13 dômes d'observatoires qui émergent de la forêt de chênes blancs. Le domaine couvre 180 hectares qui sent bon le thym et semble un cadre de travail inspirant.

D'ailleurs le pique-nique se fait sous les arbres et sous le soleil avant de repartir à la rencontre du mât ICOS. ICOS est une station d'étude de l'atmosphère qui recueille des données sur 3 de ses niveaux et les transmet par fibres optiques (encore elles !) au bloc d'analyse automatisé dédié pour déterminer 24 h sur 24 les teneurs en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ...



*La tour ICOS, une infrastructure de recherche européenne de mesure des concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre et des flux de carbone sur les écosystèmes et l'océan.*

Imaginez un mât haut de 101,5 m pesant la modeste masse de 150 tonnes et simplement posé sur un cube de béton de  $1 \text{ m}^3$  ! De quoi être inquiet en cas de tempête, non ? Ouf, il est solidement arrimé par un jeu de câbles qui lui autorise un basculement de 10 à 15 cm seulement. De son côté, le LIDAR s'occupe des basses couches atmosphériques en envoyant un laser de manière continue pour recueillir les informations par écho.

Notre marathon se poursuit avec la visite du site de recherche écologique encadrée par le passionnant professeur Thierry Gauquelin et son assistant ingénieur. Depuis les passerelles métalliques installées dans la fameuse forêt, nous accédons à la canopée d'un carré de chênes et d'érables de Montpellier. L'idée est de mettre ces arbres

en stress hydrique puis d'observer et mesurer leur comportement. Le pourtour méditerranéen étant promis à un futur climatique rigoureux, les chercheurs ont pour challenge d'en connaître les conséquences pour anticiper et réfléchir sur les solutions à apporter. Ainsi, un auvent escamotable est prévu pour s'abaisser quand il pleut, privant  $300 \text{ m}^2$  d'arbres de 30 % de l'eau de pluie. Sol et feuilles sont régulièrement et rigoureusement analysés et comparés, depuis 6 ans.

Ce travail de fourmi commence à porter ses fruits, puisqu'il semblerait que ce petit monde privé d'eau adopte un comportement de survie d'accommodation, au lieu de disparaître, comme certains pronostics pessimistes le prédisent.



*L'O3HP (Oak Observatory at OHP) est un observatoire pour étudier la dynamique, le fonctionnement et la biodiversité d'une forêt méditerranéenne face aux changements climatiques.*

Dernière étape de cette riche journée, présentation d'IRiS par Cyrille Baudouin. IRiS est un observatoire complet commandé à distance grâce à son télescope de 50 cm et son interface informatique. Des outils merveilleux mis à disposition du monde de l'enseignement en donnant la possibilité de réaliser des projets d'astronomie « comme des vrais chercheurs », autorisant la réalisation d'images couleur de grande précision, le suivi du transit d'une exoplanète... La grande facilité d'utilisation d'IRiS le rend accessible et incite à l'utiliser pour développer chez les élèves la curiosité du ciel. Une expérience pédagogique à ne pas rater !

Journée riche ! Encore une !

#### **Quelques autres nouvelles de l'association**

L'assemblée générale aura lieu le 31 mars 2019 à La Rochelle. Réservez la date dès maintenant !

Le hors-série n° 14 « Le Soleil » sort des presses en octobre. À commander sur le site de vente du CLEA.

Le CLEA tiendra un stand aux journées de l'UdPPC et de l'APMEP à Bordeaux ainsi que pendant les Rencontres du Ciel et de l'Espace à La Villette.



Vous souhaitez débiter ou vous perfectionner en astronomie ?

Vous avez envie de développer vos savoir-faire pédagogiques au contact de collègues expérimentés ?

Venez participer au col Bayard, à une école d'été d'astronomie, dans un cadre majestueux.



Exposés accessibles à tous, ateliers pratiques et observations du ciel : toutes les activités sont encadrées par des astronomes professionnels et des animateurs chevronnés.

Renseignements et vidéo sur :  
<http://clea-astro.eu/aLaUne/EcolesdEtedAstronomie>

## Les productions du CLEA

*En plus du bulletin de liaison entre les abonnés que sont les Cahiers Clairaut, le CLEA a réalisé diverses productions.*

*Fruit d'expérimentations, d'échanges, de mises au point et de réflexions pédagogiques d'astronomes et d'enseignants d'écoles, de collèges, de lycées, ces productions se présentent sous différentes formes :*

### Fiches pédagogiques

Ce sont des hors série des Cahiers Clairaut conçus par le Groupe de Recherche Pédagogique du CLEA : astronomie à l'école, la Lune, gravitation et lumière, mathématique et astronomie, ...

HS10 Mathématiques et astronomie (2012)

HS11 Les constellations (2014)

HS12 L'astronomie à l'école (2016)

### Fascicules thématiques de la formation des maîtres, en astronomie

Repérage dans l'espace et le temps, le mouvement des astres, la lumière messagère des astres, vie et mort des étoiles, univers extragalactique et cosmologique, ...

### Matériel

Filtres colorés et réseaux de diffraction.

### DVD

Les archives du CLEA de 1978 à 2006 (Cahiers Clairaut et Ecoles d'Été d'Astronomie).

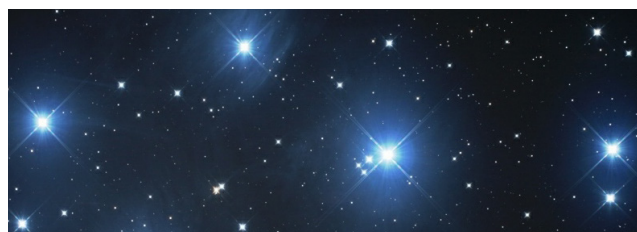
Vous pouvez retrouver ces productions sur le site de vente : <http://ventes.clea-astro.eu/>

Le formulaire de commande est sur le site.

## Le site internet

**Une information toujours actualisée**

<http://www.clea-astro.eu>

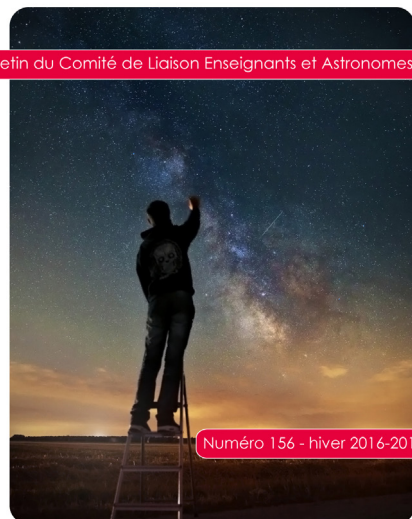


# LES CAHIERS CLAIRAUT

LES CAHIERS CLAIRAUT

N° 156 - Décembre 2016 9 €

Bulletin du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes



ISSN 0758-234X

**Publiés quatre fois par an, aux équinoxes et aux solstices, les Cahiers Clairaut offrent des rubriques très variées :**

Articles de fond  
Réflexions  
Reportages  
Textes (extraits, citations, analyses)  
Pédagogie de la maternelle au supérieur  
TP et exercices  
Curiosités  
Histoire de l'astronomie  
Réalizations d'instruments et de maquettes  
Observations  
Informatique  
Les Potins de la Voie Lactée

## COMMENT NOUS JOINDRE ?

**Informations générales :**

<http://www.clea-astro.eu>

ou

<http://www.ac-nice.fr/clea>

**Siège social :**

CLEA, c/o CAPE  
case courrier 7078  
Université Paris Diderot  
5, rue Thomas Mann

75205 PARIS Cedex

**École d'Été d'Astronomie :**

[daniele-imbault@laposte.net](mailto:daniele-imbault@laposte.net)

**Cahiers Clairaut :**

[christianlarcher3@gmail.com](mailto:christianlarcher3@gmail.com)

**Ventes des productions :**

<http://ventes.clea-astro.eu/>

**Site internet :**

[berthomi@ac-nice.fr](mailto:berthomi@ac-nice.fr)  
[charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr](mailto:charles-henri.eyraud@ens-lyon.fr)

**Adhésion / Abonnement :**

Adhésion CLEA pour 2018 :	<b>10 €</b>
Abonnement CC pour 2018 :	<b>25 €</b>
Adhésion + abonnement CC :	<b>35 €</b>
Adhésion + abonnement CC + abonnement numérique :	<b>40 €</b>

**Les adhésions, abonnements et achats peuvent se faire directement en ligne sur le site : <http://ventes.clea-astro.eu/>**

Directrice de la Publication : Cécile Ferrari  
Rédacteur de publication : Christian Larcher  
Imprimerie Grapho12, 12200 Villefranche de Rouergue

Premier dépôt légal : 1er trimestre 1979  
Numéro CPPAP : 0315 G 89368  
Prix au numéro : 9 €

Revue trimestrielle : numéro 163 automne 2018