

Comité de Sauvegarde des Sites de Meudon

Bulletin 152-153

Février 2019

L'astrophysique à Meudon aujourd'hui



Quelques exemples de recherches à l'Observatoire sur le site de Meudon

Editorial

L'Observatoire abrite actuellement un des centres de recherche publique les plus importants de France, reconnu mondialement. Ses activités de recherche semblent pourtant méconnues des Meudonnais. Ce bulletin se propose d'en exposer quelques-unes à l'intention des non spécialistes.

Le site de Meudon de l'Observatoire constitue aussi un élément essentiel de notre patrimoine historique et scientifique ainsi qu'un site remarquable du paysage de l'Ile-de-France.

Rappelons que le "Château Neuf" de Meudon fut construit en 1705 par Jules Hardouin- Mansart (1646-1708) pour Louis de France, fils de Louis XIV, le Grand Dauphin. Le Château Neuf fut gravement endommagé par un incendie suite à un accident en 1871. À la demande de Jules Janssen, fondateur de l' "observatoire d'astronomie physique" sis à Meudon, des travaux audacieux de transformation et de restauration furent entrepris à partir de 1879. Les ailes ou avant-corps furent conservés sur deux niveaux cependant qu'une partie centrale arrondie surmontée par une grande coupole fut érigée. La plus grande lunette astronomique d'Europe a pu ainsi y prendre place. À la fin du 19^{ème} siècle, l'Observatoire abritait également le plus puissant télescope photographique du monde. Ces instruments ne sont pratiquement plus utilisés, les observations se faisant essentiellement via des sites distants ou à bord d'instruments placés sur des sondes spatiales ou satellites.

Depuis sa restauration, débutée en 2005, la coupole brille à nouveau dans le paysage de l'Ile-de-France, de même que la tour solaire conçue en 1963 qui domine la forêt et est visible d'une grande part de la région.

L'Observatoire abrite en outre un domaine de 64 hectares séparé de la forêt par un mur d'enceinte bâti sous Louis XVI. Des ouvertures laissent voir de l'extérieur les belles perspectives du parc. Cet espace permet de protéger une faune et une flore remarquables.

Le Comité s'est depuis longtemps intéressé à ce patrimoine et y a consacré par exemple les bulletins 119 à 122 du CSSM parus en 2006 et accessibles en ligne.

Réciproquement un certain nombre de membres de l'Observatoire s'impliquent dans la vie meudonnaise et notamment au CSSM.

Il nous semble cependant que c'est une mission importante de l'Observatoire en tant qu'institution de communiquer sur ses activités auprès du grand public. C'est la raison pour laquelle nous souhaitons que l'Observatoire organise à nouveau des visites régulières à l'intention de tous, afin de nous faire découvrir ses activités, voire même de susciter des vocations, dès que les bâtiments seront adaptés aux nouvelles normes de sécurité.

De même, il nous semble qu'il revient à l'Observatoire d'entretenir et de valoriser son patrimoine historique ; aujourd'hui l'entretien du corps de garde qui constitue un ensemble remarquable du 17^{ème} siècle bordant la place Janssen, ou même celui des terrasses du Château Neuf semble défaillant. Une meilleure valorisation du corps de garde pourrait être étudiée ; nous sommes aussi très favorables à l'utilisation souvent évoquée d'une partie du Château Neuf comme lieu de mise en valeur du patrimoine de l'Observatoire et de communication vers le public.

Je tiens à remercier Nicole Meyer-Vernet, directrice de recherche émérite au CNRS toujours active dans son domaine, qui consacre régulièrement du temps au Comité des Sites pour le bulletin et s'est impliquée tout particulièrement dans celui-ci.

Christian Mitjavile, Président du CSSM

SOMMAIRE

2 *Editorial*

4 *Avant-propos*

5 *Les applications biomédicales à l'Observatoire*, par Marie Glanc,
Marie Blavier et Gérard Rousset



8 *L'activité solaire vue de Meudon*, par
Brigitte Schmieder et Pascal Démoulin



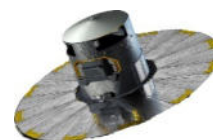
13 *Bepi-Colombo, deux sondes en orbite autour de Mercure en 2025*,
par Léa Griton



17 *Les planètes au-delà du système solaire*,
par Jean Schneider



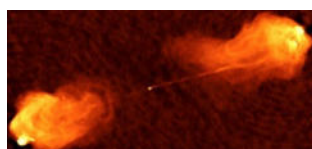
24 *Les arpenteurs du ciel, d'Aristarque à Gaia*
par Frédéric Arenou



31 *Cataclysmes et explosions cosmiques explorés en rayonnement Gamma*,
par Hélène Sol



36 *L'Univers et les trous noirs*
par Suzy Collin-Zahn



42 *In memoriam : Christian Benilan*



43 *Informations locales et nouvelles brèves*

Avant-propos

De quoi sont faits le Soleil et les étoiles ? Pourquoi brillent-ils ? Quel est l'âge de la Terre, du Soleil, de l'Univers ? La physique du 20^{ème} siècle a permis de répondre à ces questions, mais Jules Janssen eut du mal à convaincre ses contemporains de l'importance de la physique - et notamment à l'époque, de la spectroscopie - pour l'astronomie. Lorsqu'« enfin, les astronomes français comprennent que la divine science du ciel ne peut plus se borner à nous montrer des pierres inertes en mouvement dans le vide » (selon les termes de Camille Flammarion), Janssen obtient la création d'un *observatoire d'astronomie physique* indépendant de l'observatoire de Paris, qui prend effet par un décret du 6 septembre 1875. Ainsi, Janssen s'installe le 13 octobre de l'année suivante dans les communs du domaine de Meudon, et déploie ses instruments dans le parc - alors occupé par l'armée, avant de commencer les travaux de transformation des restes calcinés du Château Neuf pour y abriter la plus grande lunette d'Europe¹.

L'observatoire de Meudon est rattaché depuis 1927 à l'Observatoire de Paris (relevant du Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et membre de l'Université Paris-Sciences-et-Lettres), qui gère administrativement trois sites : Paris, Meudon et Nancay. Le site de Meudon abrite aujourd'hui plus de 500 chercheurs, ingénieurs, techniciens et administratifs – appartenant à des laboratoires dépendant du CNRS et de plusieurs Universités, et concerne plusieurs centaines d'étudiants en doctorat, master, et diplômes d'Université - en plus de la formation à distance. Il inclut des instruments d'observation, notamment solaires, et une partie importante des activités relèvent de l'espace, avec le développement et la fabrication dans ses laboratoires d'instruments novateurs embarqués sur des sondes spatiales².

Le développement vertigineux de la physique au 20^{ème} siècle, qui a bouleversé nos modes de vie, a permis des avancées spectaculaires dans les moyens d'étude et la compréhension des objets célestes, transformant l'astronomie en astrophysique. Alors que plus de 9% des français croient possible que la Terre soit plate³, nous avons pensé utile de réunir ici quelques articles écrits par des scientifiques de l'Observatoire décrivant leurs recherches à l'intention des non spécialistes, afin de donner un aperçu sur ce qui se passe derrière les murs du domaine, en attendant que la mise aux normes des bâtiments permette la reprise des visites (actuellement limitées aux classes avec leurs enseignants).

Tous les domaines de l'astrophysique sont abordés à Meudon, et les articles de ce numéro, écrits par des scientifiques travaillant sur le site, n'en couvrent qu'une petite partie. Marie Glanc et ses collègues décrivent quelques applications médicales de techniques développées pour l'astrophysique. Brigitte Schmieder et Pascal Démoulin expliquent comment le Soleil, dont l'instrument dédié le plus visible des meudonnais est la Tour Solaire, peut perturber considérablement les activités terrestres. Léa Griton aborde l'exploration de la planète la plus proche du soleil – Mercure, qui sera étudiée en 2025 par deux sondes spatiales transportant des instruments conçus et fabriqués à Meudon. Plus de 4000 planètes ont été détectées au-delà du système solaire et Jean Schneider résume les recherches faites à Meudon dans ce domaine. Frédéric Arenou décrit le développement de l'astrométrie et ses applications astrophysiques jusqu'à l'épopée récente du satellite *Gaïa*. Hélène Sol nous dévoile le prototype inédit de télescope gamma récemment installé dans le parc. Et finalement, Suzy Collin-Zahn décrit quelques exemples de recherches meudonnaises sur les trous noirs et la structure de l'Univers.

Nicole Meyer-Vernet

¹ D'après « Un globe-trotter de la physique céleste, l'astronome Jules Janssen » (Vuibert 2008), par Françoise Launay. Voir aussi les bulletins n^{os} 119 à 122.

² Les bois et les prairies abritent aussi de nombreuses espèces animales et végétales dont beaucoup sont rares et menacées ; l'enceinte de l'Observatoire a été classée en Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique (voir les articles de Marie-Rose Ramarao dans les bulletins 145-146 et 134).

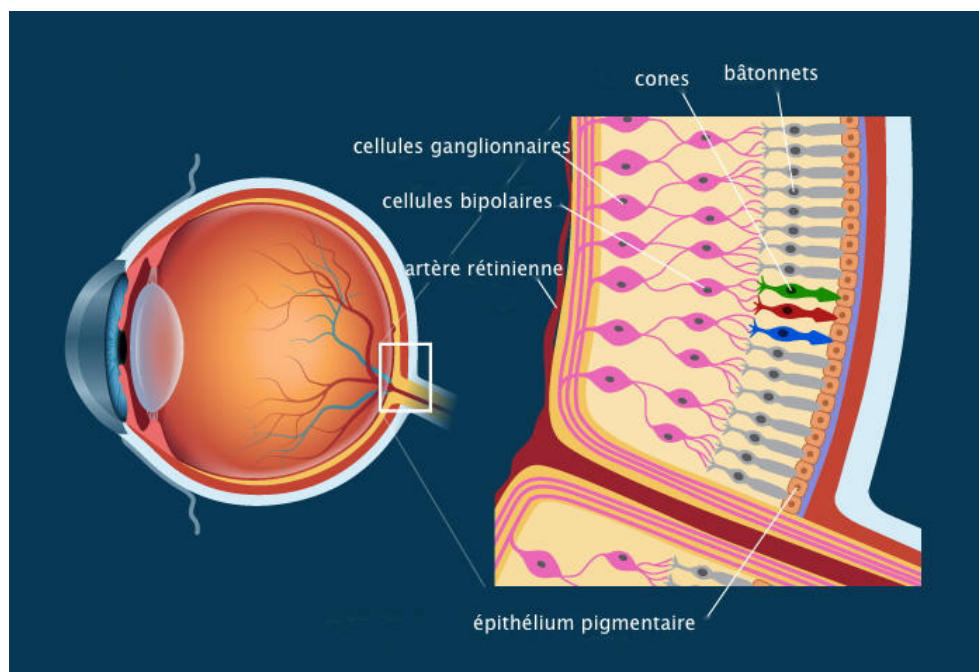
³ Enquête IFOP de décembre 2017.

Les applications biomédicales à l'Observatoire

Contexte

En 2000, 30 millions de personnes dans le monde étaient atteintes de dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) ; 25 % des 135 millions de diabétiques étaient suivis par un ophtalmologiste ; 67 millions de cas de glaucomes, soit la moitié seulement des cas existants, étaient traités. Ces trois pathologies sont responsables à elles seules de 50 % des cas de cécité. En 2025, ces chiffres auront triplé, en grande partie du fait de la prévalence élevée de ces pathologies dans la population âgée. Comme pour le cancer, le dépistage précoce est le plus sûr moyen d'enrayer cette progression et de réduire le coût humain et social de ces maladies.

Pour ce faire, les ophtalmologistes pratiquent des examens du fond de l'œil, c'est-à-dire de la rétine. Aujourd'hui, ils repèrent seulement des anomalies étendues, indiquant que la pathologie a déjà atteint un stade avancé, car la résolution des appareils d'imagerie de fond d'œil (les ophtalmoscopes) demeure insuffisante pour détecter les défauts dès leur apparition. La précision requise pour un diagnostic précoce, mais aussi pour étudier l'architecture et le fonctionnement de la rétine *in vivo*, est dans l'absolu à l'échelle de la cellule (de l'ordre du micron pour les plus petites cellules rétinienne), de préférence dans les 3 dimensions car la rétine est une structure épaisse.



Le globe oculaire et la rétine. © Allaboutvision.com.

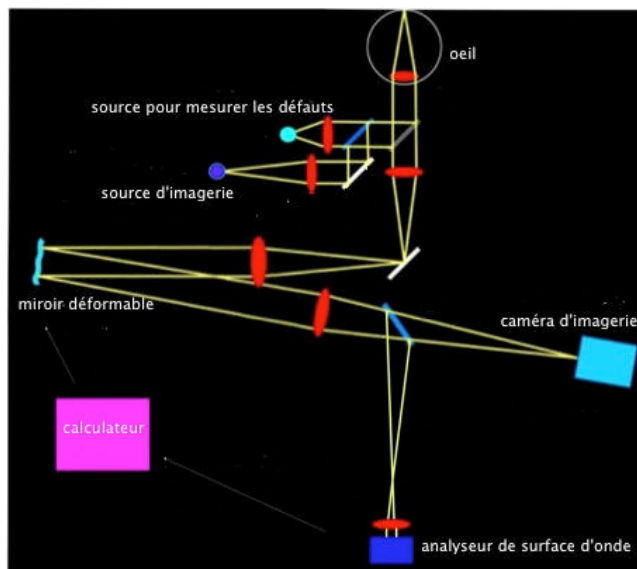
Cette précision ne peut être atteinte qu'en insérant dans l'instrument imageur un système de correction spécifique des défauts oculaires. En effet, la cause de la limitation en résolution des images de fond d'œil est la présence de « défauts optiques » (aberrations), majoritairement dus aux optiques oculaires (cornée, cristallin) et au fait que l'œil est un système vivant, toujours en mouvement. Ces défauts, normaux dans une certaine mesure et qui ne sont pas gênants pour le sujet au quotidien, s'avèrent délétères du point de vue de l'expérimentateur qui souhaite visualiser la rétine. Ils fluctuent en outre au cours du temps à différentes échelles (battements cardiaques, mouvements de la tête, modifications du film de larmes, etc.). On peut dire que ces défauts se superposent aux défauts classiques (myopie, hypermétropie, astigmatisme...) mais ne peuvent être compensés par des verres correcteurs statiques même parfaitement personnalisés. Leur réduction nécessite une technique capable de les suivre au cours du temps.

Les astronomes sont confrontés à des besoins comparables pour réaliser des images à haute résolution depuis le sol : l'image d'un corps céleste est déformée en temps réel par les aberrations induites par la turbulence atmosphérique. Ils ont alors développé la technique d'**optique adaptative** sur les télescopes pour corriger en temps réel ces déformations. Peu à peu, depuis les années 2000, et après s'être imposée dans le monde de l'astronomie, cette technique émerge dans le domaine de l'ophtalmologie mondiale, donnant d'excellents résultats et ouvrant aux médecins qui y ont accès la voie vers de nouvelles études et perspectives.

Travaux menés à l'Observatoire

Depuis 15 ans, à Meudon, nous avons développé et testé des instruments basés sur l'utilisation de différentes techniques optiques afin de proposer aux ophtalmologistes des solutions innovantes pour obtenir des images de la rétine à haute résolution. Plus récemment, une collaboration avec des neurobiologistes et physiciens de l'ENS doit permettre de déboucher sur un microscope de nouvelle génération permettant l'observation du cervelet du rat par exemple, avec une précision et sur une profondeur inégalées. La problématique d'obtention d'images de très bonne qualité lors de la mise en œuvre de techniques de microscopie est en effet similaire à celle rencontrée pour l'imagerie de la rétine même si les milieux sont très différents. Une solution commune peut être l'utilisation de la technique astronomique d'optique adaptative.

Dans les locaux de l'Observatoire, il n'est pas possible de travailler sur des rongeurs vivants pour effectuer de l'imagerie du cerveau ou avec des sujets pour l'imagerie ophtalmologique. Le protocole retenu est de mettre au point des instruments que l'on valide sur des échantillons biologiques entre lame et lamelle, utilisés dans des conditions proches de celles sur le vivant (création artificielle de mouvements et de défauts optiques caractéristiques de ceux rencontrés *in vivo*). Ces instruments sont ensuite transportés au sein des structures adéquates pour passer à l'étape expérimentale. Un exemple d'un tel cheminement est décrit dans la suite de cet article : un instrument d'imagerie du fond de l'œil par optique adaptative a été conçu, réalisé et testé à l'Observatoire puis transféré à l'hôpital des Quinze-Vingts, où il a fait partie intégrante d'un protocole clinique validé par le comité consultatif des personnes entre 2005 et 2009.

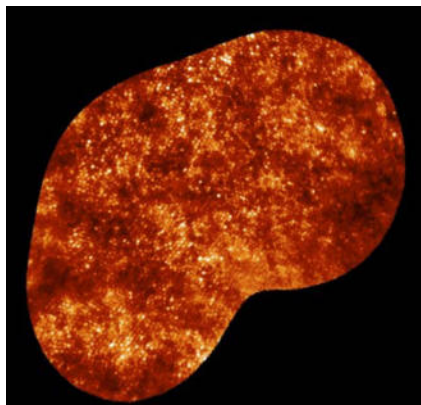


L'optique adaptative

Schéma de principe d'un système d'optique adaptative (OA) pour la correction des défauts oculaires et l'imagerie de la rétine.

Le principe de l'optique adaptative (OA) pour l'ophtalmologie est similaire à celui de l'astronomie. Il consiste à opposer aux déviations indésirables des rayons lumineux dues aux défauts optiques, des déviations compensatrices. Le système comprend trois éléments-clés : l'analyseur de surface d'onde, le miroir déformable et le calculateur (ordinateur). Le patient fixe un point lumineux dont l'image qui se forme sur sa rétine devient la source de référence du système, celle qui va permettre de mesurer les aberrations oculaires. La lumière issue de cette source secondaire sur la rétine va vers l'analyseur de surface d'onde en passant par le miroir déformable qui peut la dévier localement. L'analyseur mesure à très haute cadence (plusieurs dizaines, voire centaines de fois par seconde) les défauts optiques de l'œil étudié. L'ordinateur

associé calcule les défauts relatifs aux mesures effectuées et communique au miroir les informations utiles pour corriger ces défauts. Le miroir déformable s'adapte ainsi à toute évolution des aberrations. Concrètement, il permet de réorienter en temps réel les rayons lumineux issus de l'œil dans la direction qu'ils auraient prise si l'œil ne souffrait pas de défauts optiques, entraînant au final la formation d'une image « parfaite » de la rétine, identique à celle obtenue à travers un œil sans défaut optique. Les dimensions de la zone observable sont toutefois limitées car les rayons lumineux issus de différents points de la rétine traversent des zones de cristallin et de cornée distinctes. Les aberrations engendrées sont alors légèrement différentes et une correction propre à chaque point devrait en toute rigueur être appliquée au miroir. Avec une correction commune, le champ observable est limité à quelques degrés (3 degrés de champ correspondent environ à un millimètre au fond de l'œil).

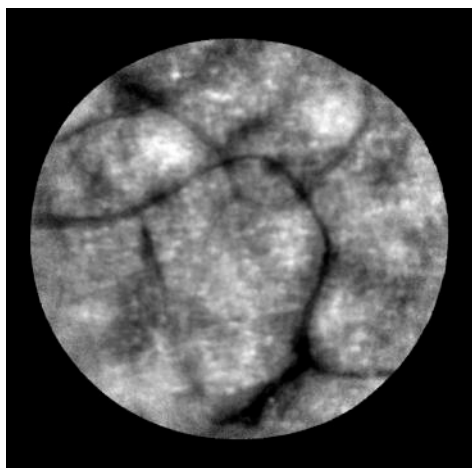


Les premières images corrigées par OA de la mosaïque des cônes au centre de l'œil ont ainsi été obtenues dès 2001 à l'Observatoire. Il a fallu plusieurs années pour améliorer les performances de l'instrument, en termes de fiabilité et de robustesse, et pouvoir atteindre un niveau de performances permettant une installation à l'hôpital, en Centre d'Investigation Clinique. Un exemple d'image caractéristique de la mosaïque des cônes chez un sujet sain est donné ci-contre (fausses couleurs).

Image (2,5°X2,5°) de la mosaïque des cônes et bâtonnets en périphérolaire (environ 1,5 degré d'excentricité) chez un sujet sain. Résolution : environ 2 microns.

Ces travaux basés sur l'utilisation d'OA sous diverses modalités et pour différentes applications se poursuivent à l'hôpital des Quinze-Vingts, mais repris par une équipe du centre de l'ONERA de Châtillon qui a développé son propre instrument imageur de la rétine.

A l'Observatoire, nous avons décidé d'orienter nos recherches sur l'imagerie rétinienne dans une voie différente : en effet l'OA seule ne suffit pas à bien distinguer les différentes couches de la rétine



dans la profondeur. Ainsi, lorsque l'on réalise des images de vaisseaux sanguins, on retrouve la contribution défocalisée (floue) des cônes et bâtonnets situés plus en profondeur (ci-contre).

Image de capillaires rétiens chez un sujet sain. On distingue, en arrière-plan, les cônes et bâtonnets défocalisés qui se trouvent plus en profondeur par rapport aux capillaires.

L'ajout d'une technique interférométrique par exemple peut pallier ce manque. Dans ce cadre, la tomographie par cohérence optique plein champ développée à l'ESCPI (École Supérieure de Physique et Chimie Industrielles de la ville de Paris) semble bien adaptée. Les photons servant à former

l'image de rétine sont ici triés en fonction de leur « temps de vol », c'est-à-dire de la profondeur de rétine de laquelle ils sont issus. Grâce à ce nouvel instrument en cours de tests sur des échantillons à l'Observatoire, nous observerons la rétine dans les trois dimensions, avec une résolution inégalée, réalisant ainsi de manière non invasive de véritables biopsies « optiques ».

Marie Glanc, Marie Blavier et Gérard Rousset

L'activité solaire vue de Meudon

A Meudon, nous étudions le Soleil depuis plus d'un siècle, quand Jules Pierre Janssen arriva sur le domaine, au château délabré après les incendies provoqués par les explosions des stocks de poudre à canon qui y étaient entreposés. Il reconstruisit une partie du château et y installa le grand dôme de 30 mètres de diamètre qui abrite une lunette pour observer les planètes et les étoiles doubles. En même temps, il installa sa lunette d'éclipse dans le parc et photographia le Soleil. Ces plaques photo de 40 cm de côté existent encore et peuvent être vues lors de journées portes ouvertes de l'Observatoire. Beaucoup d'autres instruments ont été ensuite développés comme le petit sidérost, le grand sidérost et, en 1969, la tour solaire que l'on voit dominer sur la colline de Meudon.

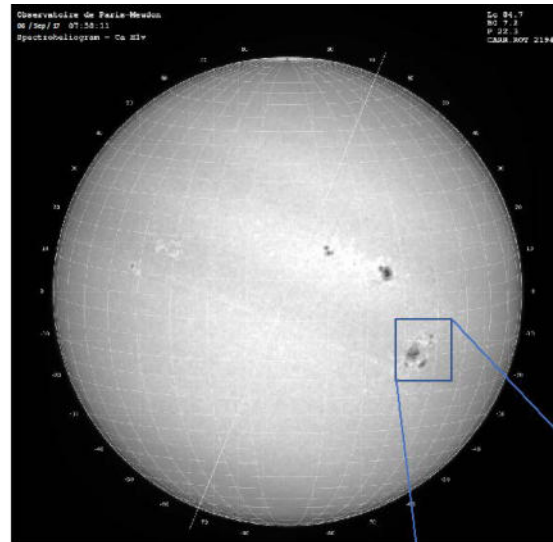


Figure 1. *Majestueusement dressée à l'orée du bois, la tour solaire est un bâtiment énigmatique pour la plupart des habitués du site. Rares sont les privilégiés qui ont eu la chance d'y observer le Soleil ou même d'admirer la capitale du haut de ses 35 mètres. La tour est pourtant l'un des instruments solaires les plus performants au monde avec son spectrographe de 14 mètres et le miroir de son télescope de 60 centimètres de diamètre. Elle est encore un outil de recherche et d'enseignement pour la communauté solaire française. (Photo B. Schmieder, crédit R. Lecocguen)*

Pourquoi étudier le Soleil depuis si longtemps ? Tout le monde connaît le Soleil qui ponctue nos jours et nos nuits et aussi nos saisons. Mais qui observe le Soleil au zénith ? Personne nous l'espérons car ses rayons brûlent la rétine de nos yeux. Par contre on peut le voir rouge à son lever ou son coucher, car l'atmosphère de la Terre a diffusé ses rayons bleus et jaunes, mais aussi au travers des nuages qui en absorbent toutes les couleurs et le font apparaître blanc. Seuls les astronomes observent le Soleil directement avec leurs télescopes munis de filtres. Et là on s'aperçoit que le Soleil est soumis à une activité magnétique importante qui a un cycle de 11 ans. C'est ainsi que l'on observe à chaque maximum d'activité plus de taches sombres (car plus froides) à sa surface (Figure 2). Ces taches sont fortement magnétisées avec un champ typiquement 5000 fois plus intense que le champ magnétique terrestre. De ces régions s'échappe épisodiquement de la matière brillante et chaude lors d'éruptions, non pas volcaniques, mais solaires (Figure 3). On peut observer le Soleil avec des filtres qui sélectionnent telle ou telle couleur. Ces couleurs sont visibles lors des arcs en ciel qui sont en fait la décomposition de la lumière du Soleil par les gouttelettes d'eau qui jouent le rôle de prismes. Ces couleurs sélectionnées par les filtres correspondent à l'état de la matière gazeuse formée d'hydrogène principalement et de calcium. Elles correspondent aussi à des températures bien précises : 6000 à 10000 degrés pour l'hydrogène, 4500 degrés pour le calcium.

Figure 2. Développement de la région magnétique n° 12673 du 2 au 6 Septembre 2017.

En haut : image du Soleil prise au spectrohéliographe de Meudon dans une raie spectrale du calcium le 6 Septembre 2017.



En bas : une vue détaillée, observée par le satellite SDO, montrant le développement de la grande complexité de la configuration de cette région avec un nombre croissant de taches. Les traits pointillés blancs sont des méridiens et des parallèles (à l'équateur solaire). ©NASA

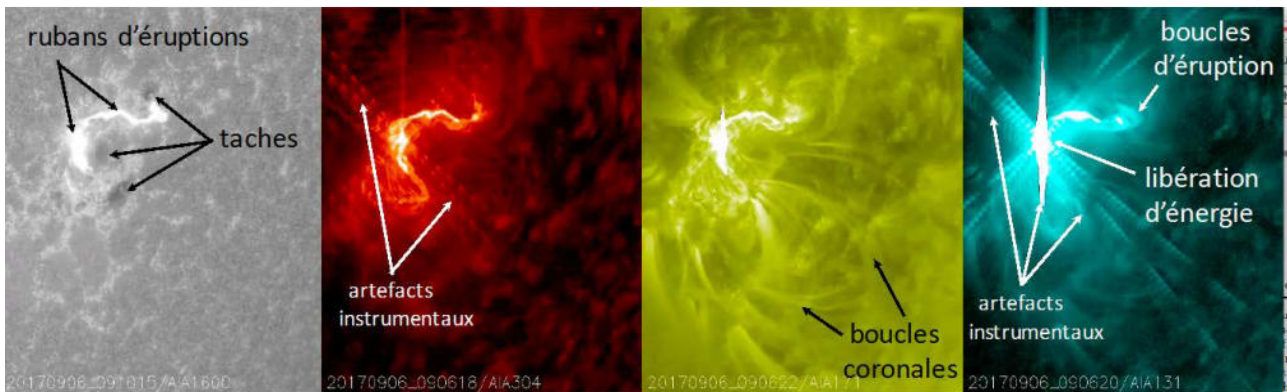
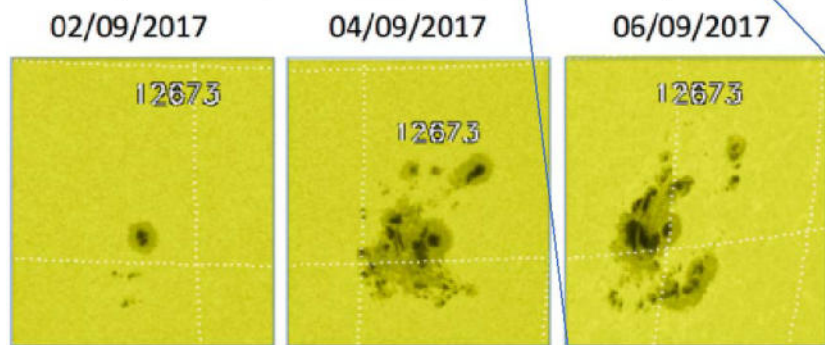


Figure 3. Eruption du 6 Septembre observée par le satellite SDO dans plusieurs longueurs d'onde de la photosphère ($1600 \text{ \AA}$), la zone de transition ($304 \text{ \AA}$), à des températures de plusieurs millions de degrés ($171 \text{ \AA}$ et $131 \text{ \AA}$). Les longueurs d'ondes observées sont dans l'ultraviolet, donc non visible par l'œil, et les couleurs sont une convention de représentation. Crédit J.-M. Malherbe.

Depuis l'espace, les télescopes peuvent observer l'ultraviolet, qui est émis lorsque la température atteint plusieurs dizaines de milliers de degrés, puis en rayons X au-dessus de plusieurs millions de degrés. Au sol le soleil peut être aussi observé avec des radiotélescopes dans les ondes centimétriques et décimétriques (proches des fréquences de radio FM). C'est le cas à l'observatoire de Nançay, dans le Loiret, qui dépend de l'Observatoire de Paris. Ainsi on peut obtenir une tomographie à trois dimensions de l'atmosphère solaire en observant le spectre électromagnétique du soleil depuis les rayons X jusqu'aux longueurs d'ondes radio. Cette atmosphère forme une auréole blanche autour du soleil quand la lune ou un disque artificiel cache le disque solaire, d'où son nom de couronne solaire (Figure 4).

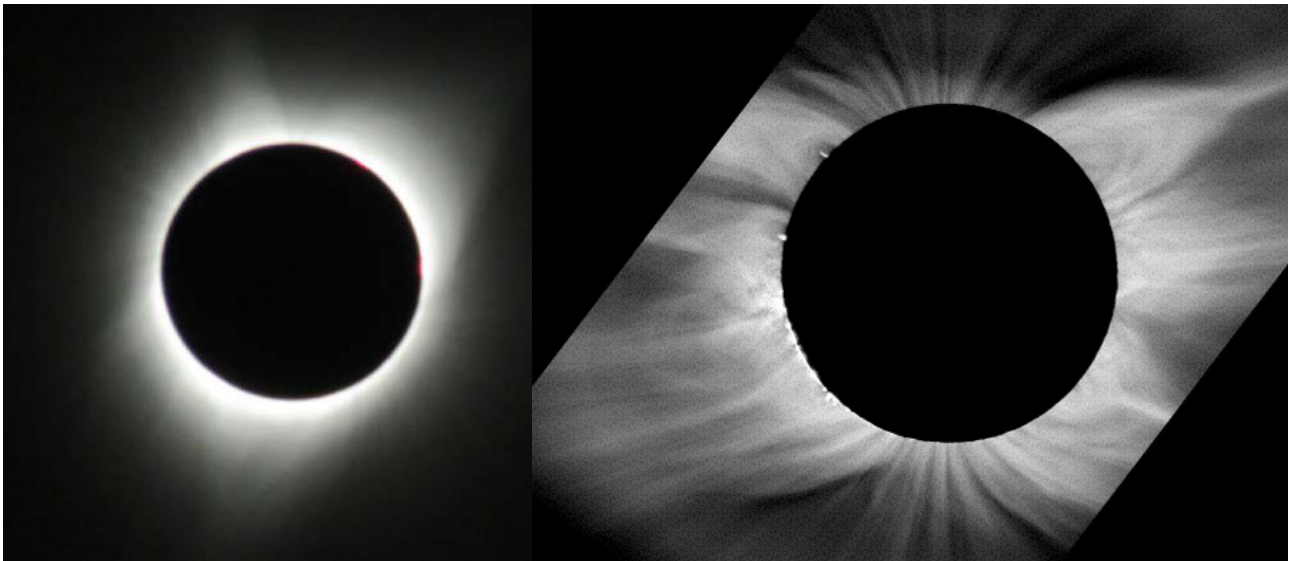


Figure 4. Eclipses totales de Soleil. A gauche, image prise avec un appareil photo sans trépied le 21 Aout 2017 dans l'Oregon (USA) par Brigitte Schmieder. Des protubérances sont visibles au bord du disque avec un liseré rouge. A droite, image prise avec un télescope le 29 Mars 2006 en Egypte par Serge Koutchmy et Jean Mouette (Institut d'Astrophysique de Paris). Les structures allongées aux pôles nord et sud (haut et bas de l'image) sont semblables à l'organisation de la limaille de fer autour des pôles d'un aimant. A plus basses latitudes d'autres structures magnétiques organisent la matière ionisée de l'atmosphère solaire.

C'est grâce au rayonnement des éléments chimiques que l'on a découvert dans les années 1940 que la couronne, observée au Pic du Midi par Bernard Lyot ou lors des éclipses, avait une température de 1 million de degrés loin (2 à 3 rayons solaires) de la « surface » visible qui n'est qu'à environ 5000 degrés. C'est contraire aux lois de la thermodynamique communément admises. En effet quand on s'éloigne d'une source chaude la température diminue. En fait la réponse vient de la nature magnétique du soleil.

Globalement le soleil se comporte comme un gros aimant avec un pôle Nord et un pôle Sud et avec des ceintures d'activité magnétique dans les zones tropicales où se forment des taches (Figure 2) et des éruptions (Figure 3). Celles-ci sont liées à de multiples configurations magnétiques de type aimant, d'où des structures magnétiques complexes à l'origine des éruptions. Que devient la matière éjectée du soleil, et comment peut-elle s'échapper ? En fait les taches apparaissent par groupes de deux et ce sont les sections de gros tubes magnétiques qui émergent à travers l'atmosphère solaire car plus légers que l'environnement. Parfois, ces tubes, comme des élastiques trop stressés, se détordent et s'étendent rapidement. Une éruption se déclenche en quelques minutes. Elle libère une énorme quantité d'énergie d'origine magnétique. Les lignes magnétiques s'allongent, se reconnectent et enfin sont éjectées du Soleil. On nomme ce phénomène « éjections de masse coronale », ou encore CME (pour Coronal Mass Ejection) selon l'acronyme anglais (Figure 5). Les CMEs éjectées dans la direction de la Terre vont, après de 1 à 4 jours, venir bousculer l'extérieur de notre atmosphère terrestre, et en particulier son champ magnétique.

Ceci est un nouveau domaine de recherche qui est apparu il y a quelques dizaines d'années, lié à la compréhension des relations entre le Soleil et la Terre, « la météorologie de l'espace ». On a ainsi pu relier différents phénomènes observés depuis longtemps comme les aurores boréales (Figure 6) et les éruptions solaires observées dès 1859 par Carrington. On a aussi progressivement compris que les éruptions solaires étaient à l'origine de perturbations dans les communications télégraphiques, puis téléphoniques, puis avec les satellites artificiels. Les éruptions provoquent aussi des interruptions de courant dans les réseaux électriques, des trous dans les oléoducs norvégiens (par courant électriques induits) et des perturbations dans le fonctionnement des GPS.

Plus les outils technologiques progressent, plus les effets perturbateurs du Soleil peuvent être conséquents car ces nouveaux outils sont de plus en plus dépendants de systèmes électroniques et des communications avec les satellites artificiels. Il est donc nécessaire de prédire les éruptions solaires. A cet effet on continue à surveiller le Soleil à Meudon par des observations systématiques. On construit aussi des télescopes au sol dans le monde entier en Chine, aux Etats-Unis (DKIST avec un miroir de 4m) et bientôt en Europe avec le projet EST, et on envoie des télescopes dans l'espace.

C'est ainsi que le satellite SDO « Solar Dynamic Observatory » observe le Soleil continûment et nous renvoie toutes les 10 secondes, une série d'images du Soleil grâce à ses nombreux filtres à de multiples longueurs d'onde couvrant le rayonnement émis par les différentes couches de l'atmosphère solaire depuis la photosphère (5000 degrés) jusqu'à la couronne (1 million de degrés) et lors des éruptions (plusieurs millions de degrés, Figure 3). Ce satellite joint à un ensemble de sondes spatiales comme SOHO opérant depuis 1996, et de nombreuses sondes comme WIND, ACE et Parker Solar Probe (lancé en Août 2018) qui réalisent des mesures *in situ* du vent solaire. D'autres instruments sont sur des satellites, comme Cluster et MMS, orbitant dans la magnétosphère terrestre, notre bouclier magnétique qui nous protège en partie du vent solaire et des CMEs (Figure 5). Tous ces instruments, sur lesquels les astronomes de Meudon sont impliqués, permettent de surveiller le Soleil de façon intensive et de progresser dans la compréhension de ces phénomènes violents que sont les éruptions et les CMEs.

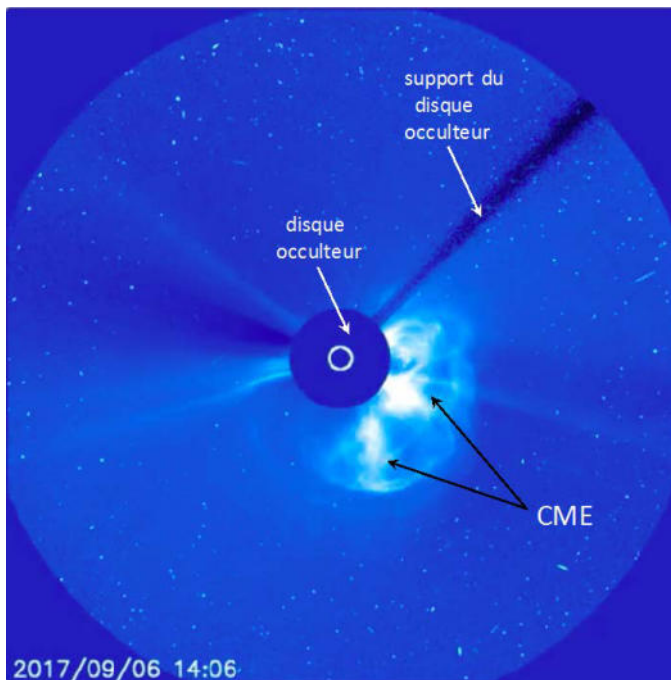


Figure 5. Ejection de matière (CME) observée le 6 septembre 2017 par le coronographe LASCO C2 sur la sonde SOHO. Le cercle blanc central indique la taille du Soleil qui est masqué par un disque occulteur plus grand.

La communauté internationale des chercheurs travaille sur toutes ces données engrangées dans des bases de données. En particulier, des astronomes du site de Meudon de l'Observatoire de Paris font des simulations numériques des éruptions pour comprendre les observations multi-longueurs d'onde. Pour cela, ils utilisent les cartes magnétiques observées du soleil et ils cherchent les caractéristiques déterminantes pour l'obtention du départ d'une CME afin de pouvoir prédire ces phénomènes. En effet, une simulation numérique est un outil qui

permet d'étudier le comportement de l'atmosphère du Soleil dans ses conditions variées et jusqu'aux conditions extrêmes (ce que l'on ne peut pas reproduire en laboratoire).

L'année dernière, du 4 au 12 septembre 2017, on a eu la surprise de voir à la surface du Soleil se développer à vue d'œil des taches (Figure 2) et se produire des éruptions importantes alors que le Soleil entrait dans une phase d'inactivité comme tous les onze ans. Une série d'observations, avec les instruments cités ci-dessus, a permis de suivre les éjections de masse coronale (CME, Figure 5) depuis le Soleil jusqu'à notre environnement terrestre. Ce fut un événement important dans l'ère de la météorologie de l'espace grâce à la mise en œuvre de nombreux instruments embarqués sur des sondes spatiales (Wind, ACE, Cluster...) faisant des mesures *in situ*. On disposait ainsi de données très précises permettant de faire des prédictions de l'arrivée de la CME, qui toutefois ne se sont pas avérées très justes. Il faudra un certain temps pour comprendre tous les enregistrements obtenus. Les éruptions qui se sont produites entre le 4 et le 10 Septembre (Figure 3) avaient une énergie

atteignant 10^{-4} watts/m² au niveau de la Terre ce qui peut se comparer à la consommation moyenne de la France en électricité sur un an.

Ces événements ont produit de grosses CMEs qui ont eu un impact important sur notre environnement. On a vu notamment trois CMEs, en forme de halo entourant le Soleil, expulsées avec des vitesses de l'ordre de 2000 km/s, qui arrivaient sous forme de nuages de plasma près de la Terre quelques jours après. Le dernier orage magnétique arrivait avec cette vitesse incroyable de 3000 km/s. On craignait le pire. Cet événement était associé à l'éjection de particules de très haute énergie enregistrées par les moniteurs à neutrons au sol aux îles Kerguelen. Conjointement, le flux de particules ionisées à haute énergie a été détecté avec les satellites en orbite mais la Terre y a échappé grâce à son bouclier magnétique (la magnétosphère). Les prévisions étaient assez alarmantes mais heureusement pour nous cet orage magnétique a évité la Terre de justesse le 12 septembre. La prédiction de l'impact avec la Terre est encore un sujet de recherche car une déviation de la trajectoire de la CME sur le trajet Soleil-Terre de quelques degrés angulaires peut changer fortement les conséquences sur notre magnétosphère. Plus généralement, de nombreux aspects des processus physiques impliqués restent à préciser et comprendre.

Figure 6. *Aurore boréale due aux éruptions solaires du mois de Septembre 2017 prise depuis la station spatiale internationale où a séjourné Thomas Pesquet. Les brillances multicolores sont dues à l'émission des atomes de la haute atmosphère bombardés par des particules de hautes énergies.* © NASA/ISS



Cependant, les effets sur la Terre ont été loin d'être négligeables. Des aurores boréales ont pu être observées jusqu'en Allemagne du Nord et au Canada jusqu'au Nord des USA (Figure 6). La même semaine le terrible ouragan IRMA dévastait les îles Saint Martin et Saint Barthélemy.

Un grand nombre de media ont relaté un black-out dans les communications à haute fréquence radio. Celui-ci a été provoqué par les particules solaires énergétiques qui ont bombardé la magnétosphère et l'atmosphère externe de la Terre. Ce black-out a interrompu les communications de première urgence pour assurer une remise en état rapide des conditions minimales de survie dans ces îles.

Pour toutes ces recherches en vue des prédictions, les observations au sol et dans l'espace sont très importantes. De plus il faut toujours associer théorie et observation afin de vérifier les modèles de simulation proposés. Les observations dans le domaine visible ne sont principalement envisageables qu'au sol car il n'est guère possible d'envoyer de gros télescopes dans l'espace. D'où l'intérêt des observations solaires à Meudon : la pollution est nettement diminuée en haut de la colline de 300 m et la pollution lumineuse du ciel nocturne ne nuit pas aux observations du Soleil. Les instruments solaires à Meudon dans le bâtiment dit du Grand Sidérost (lunette de 20 cm) et dans la Tour Solaire (miroir du télescope de 60 cm) sont toujours en fonction. Le Grand Sidérost a été rénové pour recevoir les visiteurs grâce à des fonds obtenus auprès des pouvoirs publics. La Tour Solaire, très performante en raison de la longueur exceptionnelle de son spectrographe (14 m), reste toutefois à rénover. Les visites de l'Observatoire devraient reprendre dès que le plan Vigipirate sera levé et que les aménagements nécessaires aux visites grand public seront aux normes.

Brigitte Schmieder et Pascal Démoulin

BepiColombo, deux sondes en orbite autour de Mercure en 2025

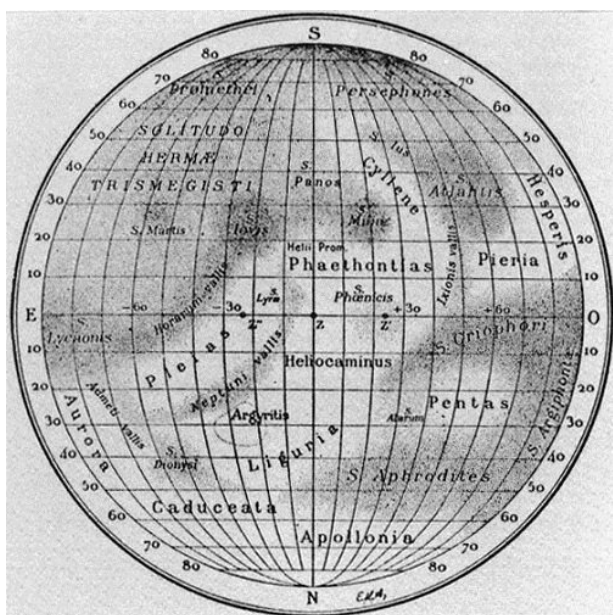
Aujourd'hui, on a parfois l'impression que l'on connaît bien notre Système solaire : après tout, si l'on est capable de détecter les ondes gravitationnelles émises par des chocs de trous noirs à des dizaines de millions d'années lumière de la Terre et que l'on prépare déjà le voyage d'astronautes vers la planète Mars, que reste-t-il à découvrir près de chez nous ? Mais le Système solaire reste encore aujourd'hui la frontière de l'exploration *in situ*, c'est-à-dire à portée de sonde spatiale.



Lancement de la sonde BepiColombo au Centre spatial guyanais du CNES à Kourou, le 19 octobre dernier. © ESA-CNES-ARIANESPACE

Au-delà, il est extrêmement difficile d'envoyer des instruments prendre des mesures « sur place » puis de les envoyer sur Terre. Le Système solaire est donc une source très importante d'informations sur la physique et la chimie en général. Mercure est un exemple d'objet qui contribue à repousser les limites de notre compréhension d'un grand nombre de questions scientifiques. Or, c'est en repoussant ces limites que l'on découvre de nouvelles théories, qui parfois peuvent avoir des applications incroyables, même des dizaines d'années plus tard. Mercure est donc un laboratoire de physique-chimie extra-terrestre qui intéresse nombre de scientifiques dans le monde.

Pourtant, seulement deux sondes spatiales se sont déjà aventurées aux abords de la planète la plus proche du Soleil. Mercure est terriblement difficile à observer depuis la Terre : uniquement visible une heure avant le lever du Soleil ou une heure après son coucher, cette planète portait d'ailleurs deux noms différents chez les Grecs anciens : Apollon le matin et Hermès le soir. D'ailleurs, l'adjectif correct pour dire « de Mercure » est d'ailleurs « herméen », et non « mercurien ».



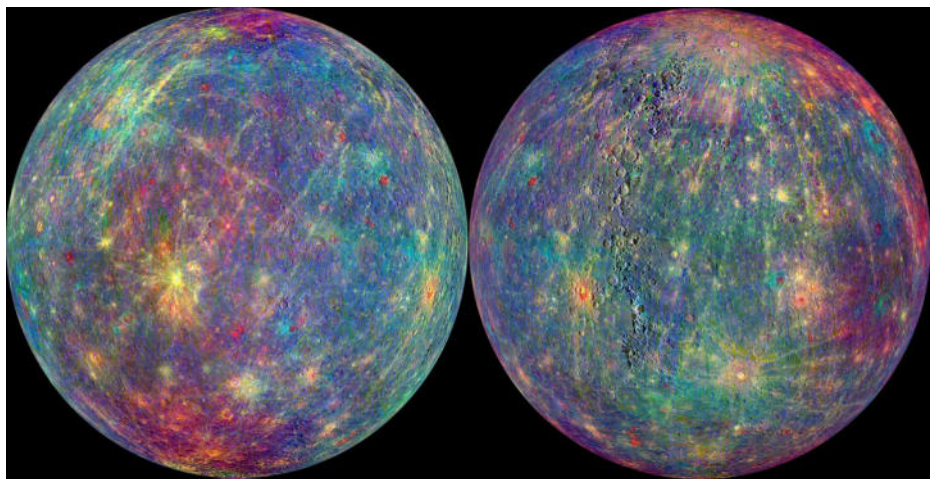
Carte de Mercure par E. Antoniadi (1934).
© Observatoire de Paris.

Avant l'ère spatiale, notre connaissance de la planète était extrêmement limitée, comme en témoigne la carte ci-contre, effectuée en 1934 par Eugène Antoniadi (1870-1944) qui a utilisé **la grande lunette de l'Observatoire de Meudon**. Cette carte était considérée comme la plus fiable avant celles dressées à partir des observations de Mariner 10.

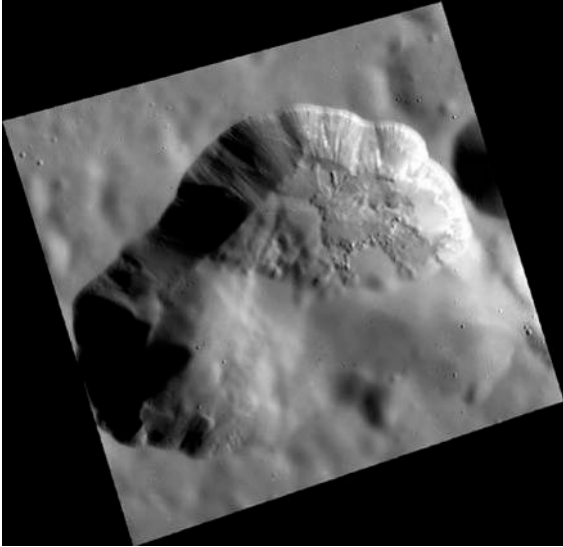
Mariner 10 est la dernière sonde du programme 'Mariner' de la NASA, et la première à utiliser la technique de l'assistance gravitationnelle (utilisation de l'attraction gravitationnelle d'un corps céleste pour modifier la trajectoire d'une sonde spatiale) pour survoler Vénus et Mercure, entre 1973 et 1975. Cette technique est alors proposée à la NASA par un chercheur italien, Giuseppe (« Bepi ») Colombo, de l'Université de Padoue, décédé en 1984. *Mariner 10* permet de faire de grandes découvertes : la surface de Mercure, photographiée à 40 %, ressemble à celle de la Lune, aucun des deux corps n'ayant à priori d'atmosphère. Mais surtout, Mariner 10 mesure un champ magnétique suffisant pour entretenir une magnétosphère (comme la Terre, alors que ni Mars ni Vénus n'en ont), et mesure une densité qui suggère que le noyau de Mercure est extrêmement gros par rapport au rayon de la planète (celui de la Lune est très petit). Mercure ne ressemble donc pas tant que ça à la Lune. Les deux survols de Mercure par Mariner 10 ne font qu'intriguer davantage les scientifiques. Comment une planète si petite peut-elle avoir un champ magnétique aussi puissant ? Comment réagit-elle à la présence si proche du Soleil ? Quelle est son histoire géologique ? D'où viennent les gaz près de sa surface ? Pourquoi n'y a-t-il pas d'atmosphère ?

Commence alors une course entre agences spatiales pour qui sera le premier à en savoir davantage ! Une première proposition scientifique est soumise à l'agence spatiale européenne (l'ESA) en 1993, mais le projet prend du retard, et c'est la NASA qui envoie, en 2008, la sonde MESSENGER, une version plus rapide, moins coûteuse mais également moins performante que le projet européen en cours de développement. MESSENGER se place en orbite autour de Mercure en 2011, et y reste jusqu'au printemps 2015. Son orbite, qui veut répondre à une multitude de questions, est assez particulière : la sonde passe très près du pôle nord de Mercure, mais très loin du pôle sud, pour pouvoir à la fois explorer la surface dans l'hémisphère nord et l'environnement de la planète et son interaction avec le vent solaire dans l'hémisphère sud.

Cartes de Mercure colorées en fonction de la couleur de la lumière réfléchiée par la surface, ce qui donne des informations sur la composition minéralogique. Par exemple, les cratères dus aux impacts récents apparaissent en jaune, les dépôts volcaniques en rouge.
© NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington.



Cette orbite permet cependant de cartographier la surface entière, même si la résolution spatiale est très faible dans l'hémisphère sud, et de relever des indices sur la composition minéralogique de la planète. A l'intérieur de certains cratères, près du pôle nord, où il fait en permanence -180°C , on détecte de la glace d'eau. Côté jour, il fait 430°C lorsque la planète, dont l'orbite est très elliptique, est le plus près du Soleil. Mercure est la planète du système solaire qui détient le plus grand écart de température à sa surface.



Cheminée volcanique près du cratère Rachmaninov (la diagonale de l'image mesure environ 55 km), © NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington.

On trouve la trace de nombreuses cheminées volcaniques, témoignant d'une activité interne passée importante.

Le champ magnétique mesuré apparaît comme un dipôle (avec un pôle nord magnétique et un pôle sud, comme le champ magnétique des aimants, ou comme celui de la Terre), décalé vers l'hémisphère nord par rapport à l'équateur. On mesure des gaz, observés également depuis la Terre, qui restent accrochés à la planète sans pour autant constituer une atmosphère : on appelle ceci une « exosphère », et celle de Mercure apparaît comme très dynamique.

BepiColombo, nommée en l'honneur du chercheur italien éponyme, est une mission spatiale composée non pas d'une, mais de deux sondes spatiales, qui seront déployées en même temps autour de Mercure. **La mise en orbite synchronisée de deux sondes autour d'une planète est une première dans l'histoire de l'exploration spatiale.** Cela permettra d'étudier en même temps la surface de la planète et son environnement.

Vue d'artiste des sondes Mercury Planetary Orbiter (MPO, premier plan) and Mercury Magnetospheric Orbiter (MTM, second plan) composant la mission BepiColombo près de Mercure. © ESA/ATG ; NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington.



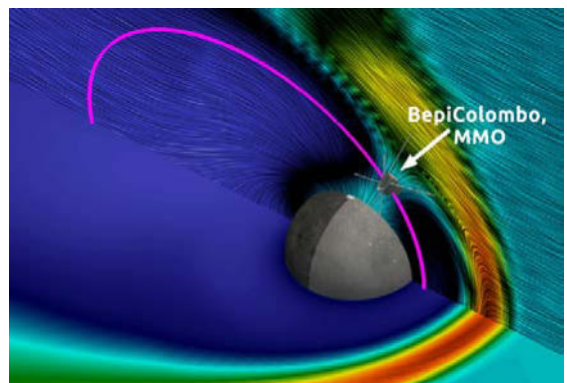
L'une des sondes, MPO, est fabriquée par l'ESA, qui est également chargée du module de transfert (pourvu de grands panneaux solaires et de quatre moteurs à propulsion ionique, pour effectuer le voyage de la Terre à Mercure) et du bouclier thermique de l'autre sonde, MMO, fabriquée quant à elle par l'agence japonaise JAXA.

BepiColombo est donc mieux dotée que MESSENGER pour apporter des réponses plus précises à six grandes questions scientifiques. La première consiste à étudier Mercure en tant que planète très proche de son étoile : les milliers d'exoplanètes découvertes sont souvent très proches de leur étoile, et Mercure nous permettra de mieux comprendre l'impact d'une telle proximité sur la planète. La seconde, c'est comprendre Mercure en tant que planète de type terrestre : surface, histoire géologique, composition interne. En troisième lieu, les instruments de BepiColombo vont mieux caractériser l'exosphère de Mercure : quels gaz ? en quelle quantité ? quelle évolution dans le temps et l'espace, notamment au cours des saisons herméennes ? La quatrième grande question concerne la magnétosphère de Mercure et son interaction avec le vent solaire, ce gaz ionisé qui s'échappe du Soleil en permanence, à plus d'un million de kilomètres par heure, emportant avec lui le champ magnétique du Soleil jusqu'aux confins du Système solaire.

Les deux sondes ont des instruments qui donneront des mesures inédites en matière de physique des plasmas (gaz ionisés), notamment un instrument fabriqué à Meudon, qui détectera la densité et la température des électrons autour de Mercure grâce à une méthode développée à Meudon, et désormais utilisée dans de nombreuses missions spatiales comme la récente Parker Solar Probe, partie l'été dernier explorer le Soleil.

La cinquième question concerne l'origine du champ magnétique de Mercure, qui reste un mystère. Enfin, sixième point, on va pouvoir vérifier si l'orbite de Mercure autour du Soleil est en accord avec la Relativité générale : en effet, Mercure est si proche du Soleil que l'on ne peut pas comprendre sa trajectoire autour du Soleil si l'on ne prend pas en compte la Relativité générale. Cette théorie n'ayant à ce jour jamais été mise en défaut, les scientifiques sont curieux de voir si la théorie fonctionne toujours quand on augmente la précision des mesures.

Simulation de la magnétosphère de Mercure (la planète est au centre). Crédits : Léa Griton/LESIA



L'essentiel des instruments de BepiColombo ne sera mis en marche qu'à l'arrivée à Mercure en 2025. En attendant, les scientifiques continuent d'étudier les données de MESSENGER, en particulier pour l'étude de la surface herméenne : deux thèses sont en cours à l'Observatoire de Meudon sur le sujet. Côté physique des plasmas, ces données sont très pauvres, et les scientifiques travaillent avec des simulations numériques pour essayer de prévoir à quoi va ressembler la magnétosphère de Mercure. L'une de ces simulations est présentée ci-contre.

Mercure est une planète fascinante dont je ne mentionne ici que quelques aspects. L'Observatoire a mis en place un site internet très riche pour suivre la recherche sur Mercure et BepiColombo : www.planete-mercure.fr.

Les chercheurs et chercheuses de Meudon ont ainsi un moyen de partager l'actualité scientifique de la mission avec le plus grand nombre, pendant les sept ans de voyage et jusqu'à la fin de la mission, prévue en 2027. Bon voyage, BepiColombo !

Léa Griton*

* A l'IRAP (Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie) à Toulouse depuis octobre 2018.

Les planètes au-delà du Système Solaire

Focalisons-nous sur un autre aspect des planètes, les exoplanètes, c'est-à-dire celles qui tournent autour d'étoiles autres que le Soleil. C'est un sujet à la fois très récent et très ancien. Chacun qui a conscience que les étoiles qu'il voit dans le firmament ne sont que des soleils lointains (hypothèse formulée pour la première fois par Giordano Bruno au 16^{ème} siècle – précisons que, contrairement à une idée répandue, ce n'est pas ce qui lui a valu sa condamnation à mort) peut se demander si des planètes accompagnent ces étoiles et même si elles abritent une forme de vie.

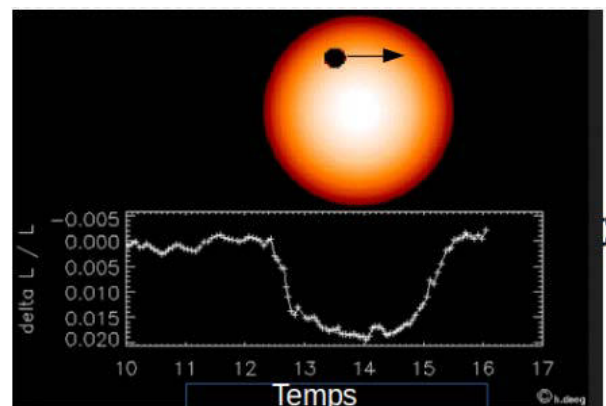
C'est une très ancienne question puisque déjà les Grecs se la posaient, en termes assez modernes. Ils y répondaient d'ailleurs positivement. En particulier avec un raisonnement encore valable aujourd'hui Epicure dans sa « Lettre à Hérodoté » en 300 av. J.-C. Depuis des centaines d'essayistes et de philosophes (Albert Le Grand, Fontenelle, Kant, Goethe...) ont exprimé leur conviction que ces planètes existent bien et que des êtres vivants y « habitent ». Il est piquant qu'une toute petite minorité de grands noms ont exprimé un point de vue opposé. Citons essentiellement Aristote, Hegel et Schopenhauer. Il est aussi intéressant de noter que seuls des auteurs occidentaux se sont posé la question. On peut y voir l'effet de la pensée grecque qui permet d'extrapoler des concepts terrestres sur la base d'arguments rationnels. Nous vivons ainsi à une époque toute particulière, et à cet égard excitante, puisqu'après plus de 2000 ans de spéculations c'est aujourd'hui qu'on découvre ces planètes.

Comment détecter et étudier les planètes.

Le plus naturel serait de photographier la planète comme on photographie les étoiles. Hélas, comme la planète tourne autour d'une étoile, la caméra est complètement éblouie par cette dernière qui est entre 10 millions (pour une planète géante comme Jupiter) et 10 milliards (pour une Terre) plus brillante qu'elle. On se rabat donc d'abord sur des méthodes indirectes, consistant à observer l'effet de la présence de la planète sur le comportement de l'étoile, comme des variations de son mouvement ou de son éclat. En effet, comme la planète et l'étoile orbitent autour de leur centre de gravité commun, ce mouvement de l'étoile révèle l'existence de la planète. Et plus la planète est massive, plus la « danse » de l'étoile est importante.

De même, lorsqu'elle est légèrement occultée par le passage devant elle de la planète, on voit une diminution transitoire de cet éclat (on parle de transit) qui, non seulement signe la présence de la planète, mais aussi permet d'en déduire sa taille (plus la planète est grande plus la diminution d'éclat est importante).

Diminution transitoire de l'éclat d'une étoile au cours du passage d'une planète devant elle. ©Hans Deeg

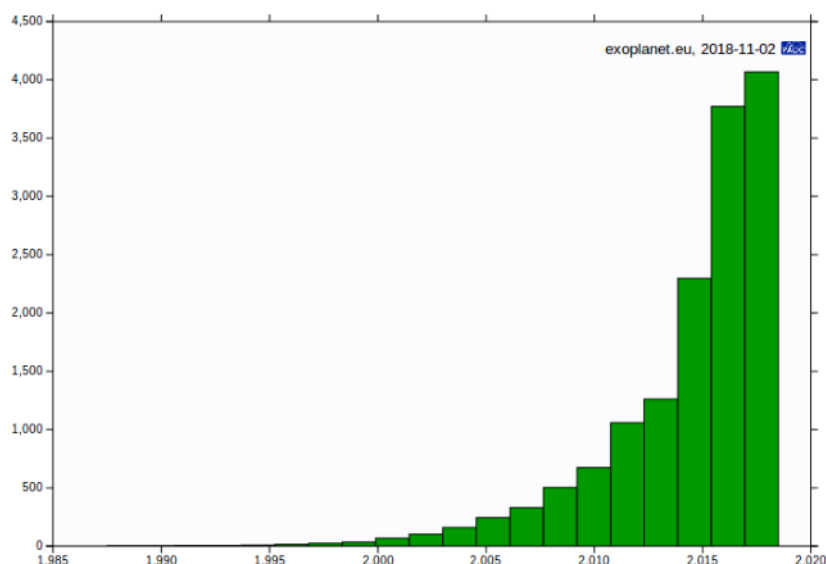


Mais l'observation directe avec une image de la planète reste le plus cher désir des astronomes, en particulier meudonnais, qui s'activent fortement pour mettre au point les techniques adéquates. Elle permettra en effet de prendre un spectre de la planète et ainsi d'étudier son atmosphère (température, composition chimique).

Rapide panorama des découvertes.

Dans ce domaine nouveau on ne compte plus le nombre de découvertes étonnantes et inattendues. D'abord, la profusion. Après la première découverte confirmée en 1989, en 30 ans on a découvert plus de 4000 planètes confirmées, dans 3000 systèmes planétaires. Et des milliers d'autres attendent une confirmation.

Progression du nombre des planètes détectées de 1989 à 2018.



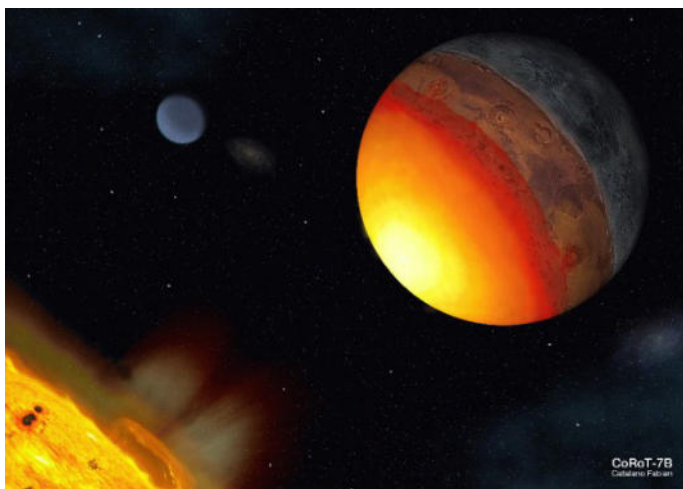
Parmi ces 3000 systèmes planétaires, aucun n'est identique au Système Solaire (avec ses 8 planètes dont la plus importante, Jupiter, 300 fois plus massive que la Terre, est située à 5 fois la distance Terre-Soleil de son étoile). Quand on extrapole ce qu'on a déjà trouvé à toute notre Galaxie (c'est la Voie Lactée visible par les belles nuits d'été), on trouve qu'elle doit abriter des milliards de planètes, dont des millions avec des conditions favorables au développement d'une forme de vie.

Mais de quel type ? C'est une autre histoire. Sur Terre le substrat de toute forme de vie est constitué de grosses molécules se combinant selon les lois de la chimie, qui en plus contiennent toutes nécessairement du carbone (sauf l'eau). Sur ces planètes pourrait-il y avoir des molécules non carbonées ? Le substrat pourrait-il fonctionner selon des mécanismes autres que chimiques, comme par exemple les écrans des téléviseurs ? Sur Terre les organismes vivants tirent leur énergie soit directement de la lumière de son étoile le Soleil (la photosynthèse des plantes, qui ne se déplacent pas) soit des autres vivants (animaux, qui se déplacent). Pourrait-il y avoir des organismes qui se déplacent mais tirent leur énergie directement de la lumière de l'étoile ? Pour l'instant nul ne le sait. On doit avant tout s'attendre à des surprises et surtout avoir l'esprit très ouvert. Remarquons que pour ce qui est de la forme des organismes l'imagination des auteurs de science-fiction est un peu limitée comme on peut le voir dans le *Dictionnaire Visuel des Mondes Extraterrestres* (Bosson et Abdelouahab, Flammarion, 2010).

Alors que dans le Système Solaire toutes les planètes (sauf Mercure) ont des trajectoires circulaires autour du Soleil, dans la moitié des autres systèmes planétaires les orbites sont très allongées. Cela a une grande influence sur leur climat. En effet, sur une orbite allongée la planète est plus ou moins chauffée par son étoile suivant qu'elle en est plus ou moins proche. Alors que sur Terre les variations saisonnières de température moyenne sont de l'ordre d'une vingtaine de degrés sous nos latitudes, et que la différence de température entre les régions les plus chaudes (déserts) et les plus froides (Antarctique) est de 130 degrés, pour les orbites très allongées des exoplanètes la variation peut être de plus de 200 degrés.

Autre énorme surprise : la moitié des planètes sont des planètes torrides, tellement elles sont proches de leur étoile. Alors que dans le Système Solaire, la plus proche du Soleil (Mercure) est à une distance de 40 % de la distance Terre-Soleil (soit 90 rayons solaires), pour ces planètes la distance tombe jusqu'à 3 rayons solaires. Sur ces planètes, chauffées par leur étoile, la température peut grimper jusqu'à 2000 degrés. Si la surface de ces planètes est rocheuse comme celle de la Terre, alors c'est en réalité un océan de lave.

Le satellite « meudonnais » CoRoT, sous l'égide du CNES, a découvert la première planète de lave, CoRoT-7 b (simulation, avec des couleurs réalistes).



A ce jour on a trouvé une trentaine de planètes pour lesquelles l'étoile autour de laquelle elles tournent est en réalité double : une paire d'étoiles qui tournent l'une autour de l'autre sur une orbite très serrée. Imaginez le spectacle sur ces planètes. Dans leur ciel on voit deux soleils, parfois de couleurs différentes, assez proches l'un de l'autre. Un spectacle en réalité déjà imaginé par l'astronome Camille Flammarion (1842-1925) et le vulgarisateur et artiste Lucien Rudaux (1874-1947).

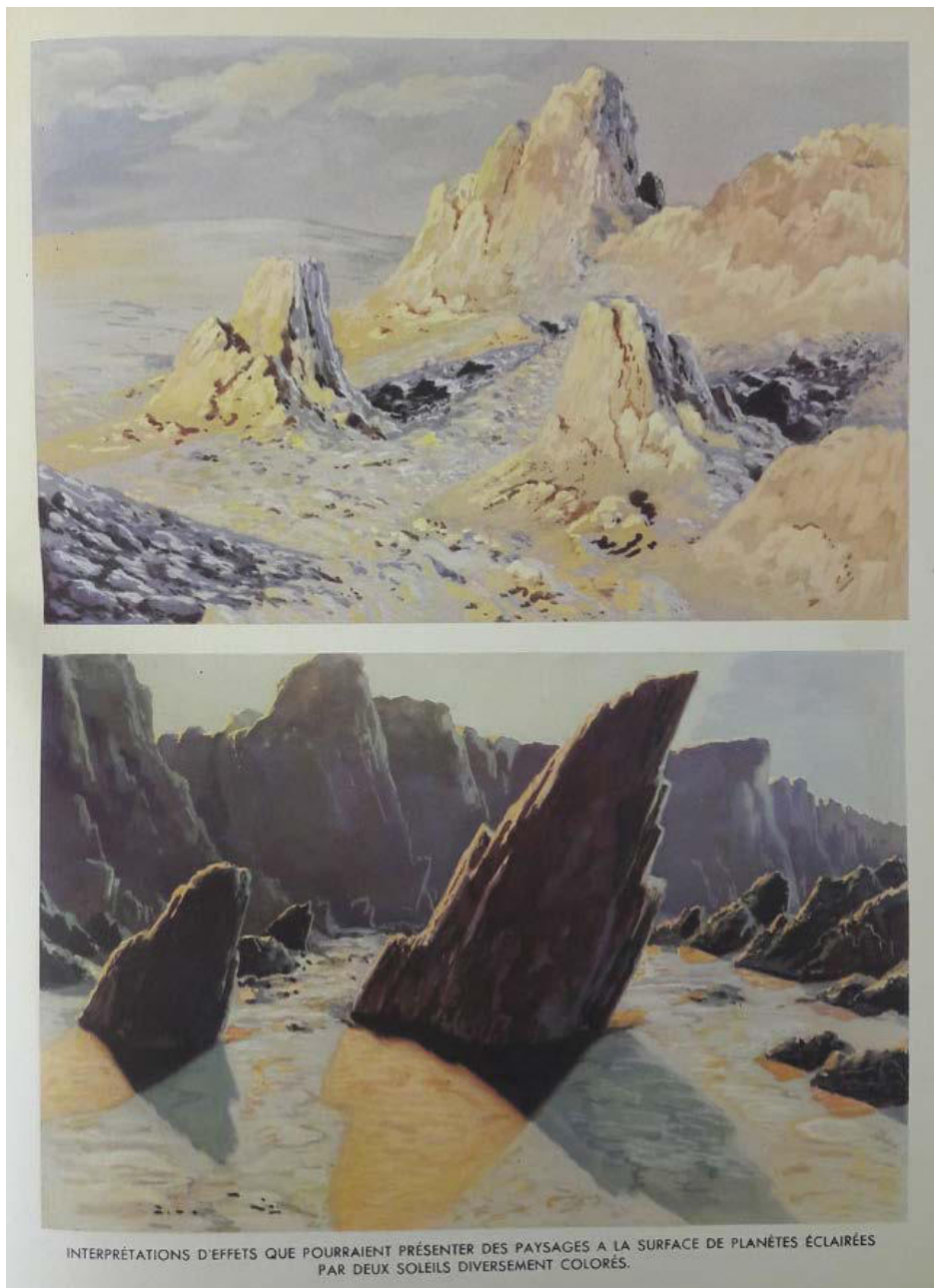
Dans le Système Solaire de nombreuses planètes (dont la Terre) ont un ou plusieurs satellites naturels, ou « lunes ». Il est donc naturel de se dire qu'il doit en être de même pour les exoplanètes. Après quelques années infructueuses de recherche, on vient de trouver la première « exo-lune ». Encore une surprise, elle est une trentaine de fois plus grande en taille et plus massive que Ganymède, satellite de Jupiter qui est la plus grosse lune du système solaire. Il est vrai que des lunes plus petites sont indétectables avec les moyens actuels.

Voyons maintenant en quoi les astronomes Meudonnais contribuent à l'avancée de ce domaine.

Idées

Pour observer correctement les exoplanètes, il vaut mieux ne pas partir à l'aveugle, et, sans préjuger du résultat, avoir une idée de ce qu'on cherche, par exemple tels ou tels types d'éléments chimiques, ce qui n'empêche pas les surprises. Il faut donc réfléchir en amont sur la meilleure manière d'observer, éventuellement, ce qu'on cherche. C'est ainsi par exemple qu'à Meudon on a inventé une manière de détecter les exo-lunes 20 ans avant la première découverte. Elle consiste à observer le transit de cette exo-lune et à détecter les perturbations temporelles qu'elle induit sur les instants de transits de la planète parente. Il arrive aussi qu'une réflexion purement théorique prédise un résultat. Cela a été le cas pour l'existence de planètes « circum-binaires » (en orbite autour d'une paire d'étoiles), prédites plus de 20 ans avant la première découverte.

Et une fois les couleurs d'une planète et leur variation dans le temps observées, les modèles théoriques élaborés à l'Observatoire permettent d'en déduire la composition chimique de son atmosphère, sa couverture nuageuse, sa température et leurs variations saisonnières.



Les ombres imaginées par Lucien Rudaux sur une planète en orbite autour de deux étoiles de couleurs différentes (Sur les autres mondes, Larousse 1937).

Réalisations

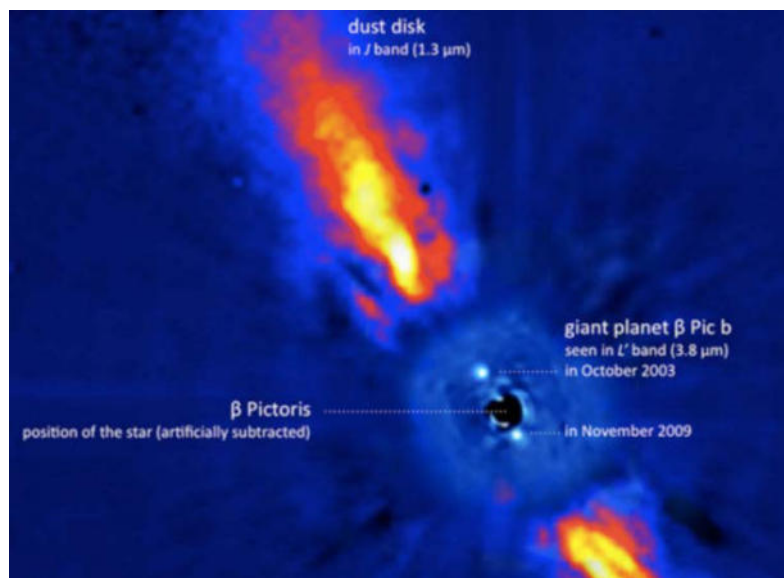
La découverte d'une planète au comportement bizarre en 1995 dans la Constellation de Pégase (c'est un Jupiter vingt fois plus proche de son étoile que la Terre ne l'est du Soleil, ce qui fait que son « année » dure 4 jours) a été le déclencheur d'une activité intense, puisque dans les mois et les années qui ont suivi on a découvert des dizaines puis des centaines et des milliers de planètes. Cela a été une surprise énorme car on ne savait absolument pas si le Système Solaire est unique ou pas. A Meudon on a néanmoins pris le risque dès les années 80-90 de se lancer dans cette recherche et de créer, au sein du site web *exoplanet.eu*, un catalogue qui à l'époque ne contenait que trois candidats planètes, encore à confirmer. Depuis, ce site, le premier au monde, est le plus cité (35000 mentions sur Internet) et est consulté 1500 fois par jour.

La détection de planètes par la méthode des transits a été inventée en parallèle en Californie et à Meudon¹ à la fin des années 80. Sa mise en œuvre avec le lancement en 2006 du satellite CoRoT a été pilotée à Meudon, sous la supervision technique du Centre National d'Études Spatiales ; le satellite équivalent (mais en plus gros) américain Kepler n'a été lancé que trois ans plus tard. CoRoT a ainsi été le premier satellite dédié à la recherche d'exoplanètes.

Des astronomes meudonnais, avec quelques autres collègues, devant le satellite CoRoT, pour les derniers préparatifs avant le lancement en 2006.



Puisque, lorsque l'on cherche à photographier une planète et ses couleurs, on est complètement ébloui par l'étoile beaucoup plus brillante située juste à côté, il faut trouver une ruse pour s'affranchir de ce grave problème. La ruse consiste à masquer l'étoile (mais pas la planète !) au moyen d'une petite pastille appelée coronographe. Facile à dire, mais extrêmement difficile à réaliser, d'une part à cause des imperfections du polissage des optiques en jeu, et d'autre part parce que la lumière est constituée d'ondes. Les ondes ont le mauvais goût de pouvoir contourner les obstacles (ici le coronographe), ça s'appelle la diffraction. Des chercheurs de l'Observatoire ont inventé et mis au point des méthodes très sophistiquées pour réaliser un coronographe. Ils ont été sollicités pour utiliser leur coronographe dans le grand télescope européen au Chili (dès 2014) et les futurs grands satellites, comme le *James Web Telescope* de la NASA, le plus grand télescope jamais conçu, avec un lancement prévu pour l'an prochain.



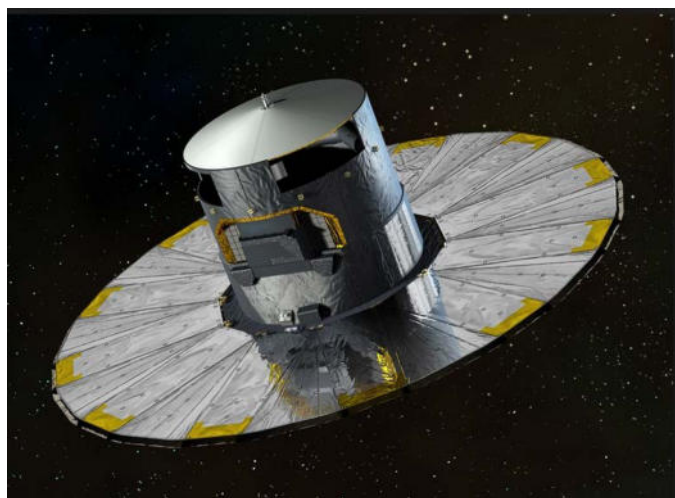
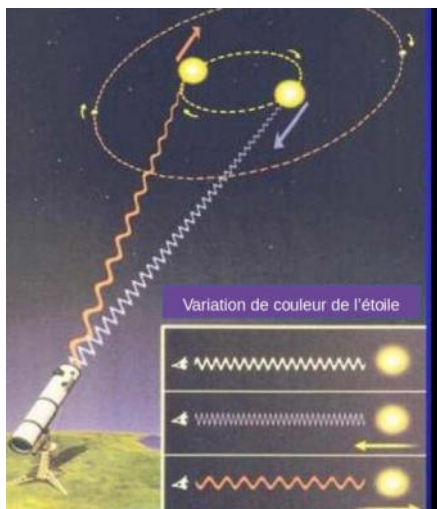
La planète de l'étoile beta Pictoris photographiée au télescope européen du Chili. On voit les deux positions de la planète en 2003 et 2009. L'étoile est masquée par le coronographe construit à Meudon.

Une première réalisation a permis de faire les meilleures observations au monde d'une planète célèbre, soupçonnée dès 1983, du nom de *beta Pictoris* dans la Constellation du Chevalet du Peintre, battant ainsi leur concurrent américain Gemini Planet Imager.

Avant de photographier une planète, on peut chercher à révéler son existence par les perturbations de mouvement qu'elle impose à son étoile parente. C'est l'un des buts du satellite européen *Gaia*, lancé en 2012, et les astronomes meudonnais et leurs collègues parisiens sont précisément chargés

¹ Pour être complet, elle avait déjà été vaguement envisagée au 19^{ème} siècle, puis plus en détail en 1938.

de ce volet. On attend ainsi d'ici un à deux ans l'annonce de la découverte d'une dizaine de milliers d'exoplanètes (voire davantage). Du travail en vue pour le catalogue de *exoplanet.eu* !

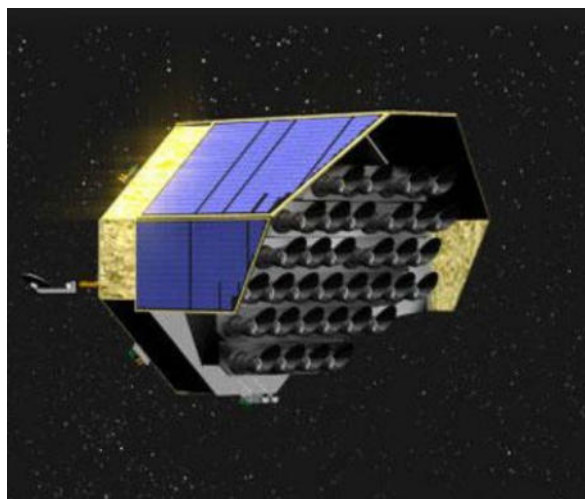


A gauche, la variation de la couleur et de la position de l'étoile due à sa perturbation par la planète. A droite le satellite Gaia qui mesure les variations de position.

Projets

Les astronomes meudonnais préparent aussi l'avenir. Ils réfléchissent depuis longtemps à la manière de trouver sinon des preuves du moins des indices d'existence d'une forme de vie sur les planètes où les conditions climatiques lui permettent de se développer. L'une de ces preuves peut être la présence d'oxygène générée par une forme de photosynthèse. C'est ainsi que c'est à Meudon qu'a été inventée dès 1992 (avant la découverte des premières planètes extrasolaires !) la méthode qui consiste à sonder l'atmosphère d'une planète lorsqu'elle passe devant son étoile. En effet, la lumière qui vient de l'étoile passe alors à travers l'atmosphère de la planète, ce qui modifie légèrement la couleur de l'étoile, suffisamment pour pouvoir ainsi déceler les gaz qui composent cette atmosphère. Une autre approche consiste à chercher un analogue à notre végétation. Puisque nous parlons de vie, qu'en est-il de la vie « intelligente » sur une planète lointaine ? Un petit nombre d'astronomes de Meudon pilotent des observations au radiotélescope de Nançay (en Sologne et qui dépend de l'Observatoire) dans le but de détecter des signaux radio « artificiels », c'est-à-dire qui ne s'expliqueraient pas par le comportement normal d'une étoile ou de toute autre corps céleste. Il faut dire que rien n'a été trouvé à ce jour (nulle part dans le monde d'ailleurs).

Dans la prochaine décennie l'Observatoire participera à la mise en œuvre de plusieurs télescopes, terrestres et spatiaux, dont le télescope *Plato* qui est une initiative meudonnaise. Ce dernier devrait détecter plusieurs dizaines au moins de « Terres habitables » proches.



Le satellite européen Plato avec ses 36 caméras.

Enfin, se prépare au Chili la construction du plus grand télescope du monde avec un miroir de 39 mètres de diamètre. Comme si vous aviez un appareil photo avec une ouverture de 39 mètres ! Avec une telle ouverture le télescope pourra prendre des images de planètes lointaines peu lumineuses, pas plus grosses que la Terre, analyser leurs couleurs et, pour les plus proches, chercher si on y voit des traces de végétation. Pour toutes ces prouesses technologiques il convient de rendre hommage à l'armée de l'ombre des centaines, et parfois des milliers, d'ingénieurs et techniciens qui les rendent possibles.

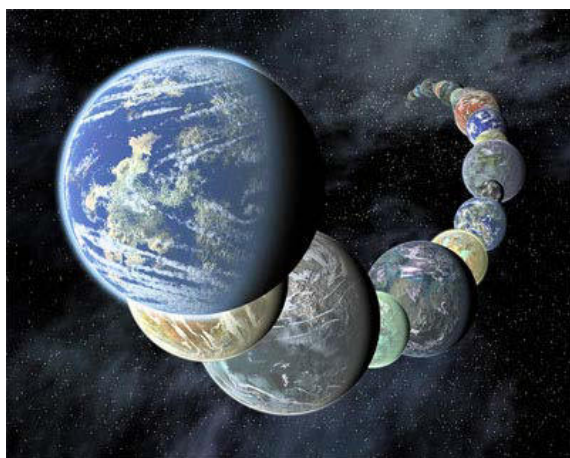
Le futur télescope européen E-ELT, installé au Chili, comparé à l'Arc de Triomphe. Il sera équipé d'une caméra en partie construite à Meudon. Copyright ESO.



Les astronomes meudonnais réfléchissent aussi, avec d'autres, aux projets d'ici 2050, et après. Une feuille de route jusqu'en 2100 a même été élaborée. Il s'agira par exemple de faire, avec des flottilles de télescopes satellisés, la cartographie d'exoplanètes pour voir la morphologie de leurs continents. Plus futuriste est la question de savoir si on pourra envoyer sur place une sonde pour les photographier de près.

A quoi tout cela peut-il servir ? L'astronomie est une activité qui voit très loin, pas seulement dans l'espace mais aussi dans le temps. Par exemple, si aujourd'hui il y a des satellites météorologiques et de télécommunications, c'est parce qu'au 17ème siècle un certain Isaac Newton (1642-1727) a cherché à comprendre pourquoi la Lune ne tombe pas sur la Terre. Et pour donner juste un exemple d'une projection d'application future de l'astronomie, citons l'exploitation de minéraux devenus rares sur Terre dans des astéroïdes, sortes de comètes, à l'horizon de la fin du 21ème siècle. Sur un plan moins utilitariste, l'astronomie par sa dimension d'imaginaire fait tout simplement partie de la condition humaine, tout comme les arts, la littérature ou les compétitions sportives.

Jean Schneider



Coda : la diversité des mondes (Crédit JPL).

Bibliographie

- Yvon Bosson et Farid Abdelouahab. *Dictionnaire visuel des mondes extraterrestres* (Flammarion 2014)
- Bernard Le Bovier de Fontenelle. *Entretiens sur la pluralité des mondes* (1686). Edition critique et commentée par Christophe Martin (GF Flammarion 1998)
- James Lequeux, Thérèse Encrenaz et Fabienne Casoli.

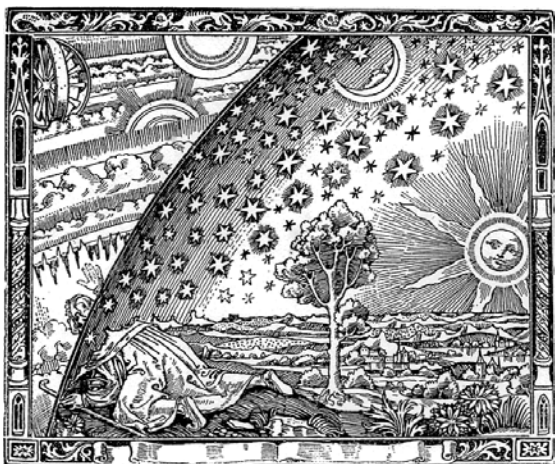
La révolution des exoplanètes. (EDP Sciences - juillet 2017)

-Lucien Rudaux. *Sur les autres Mondes* (Larousse 1937 – réédition 1989)

Pour en savoir plus : exoplanet.eu

Les arpenteurs du ciel, d'Aristarque à Gaia

« Les Étoiles fixes ne sauraient être moins éloignées de la Terre que de vingt-sept mille six cent soixante fois la distance d'ici au Soleil, et si vous fâchiez un Astronome, il les mettrait encore plus loin¹. Fontenelle savait sans doute que c'est à un astronome inventeur de grands nombres que l'on doit une des premières estimations de la dimension de notre univers. Archimède est en effet celui qui nous a fait connaître les œuvres d'Aristarque de Samos (310-230 av. J.-C.), un des seuls pendant l'Antiquité à croire à un système où le soleil, et non la Terre, occuperait une place centrale. Fâché qu'on ne sache pas compter au-delà d'une myriade², Archimède s'essaye à calculer le nombre (astronomique !) de grains de sable que pourrait contenir l'univers³. Pour ce faire, il invente une notion proche des exposants et donne la première estimation connue de la distance des étoiles fixes, 10^{14} stades (~ 2 années-lumière, soit environ 20 000 milliards de kilomètres).



L'atmosphère, météorologie populaire, 1888, Camille Flammarion.

En proposant un système où la Terre tournerait autour du soleil, Aristarque avait sans doute entendu plusieurs objections : notamment, si vraiment la Terre changeait de place au cours de l'année, alors toutes les étoiles « fixes » devraient sembler décrire un petit mouvement circulaire, conséquence du déplacement de la Terre, de la même façon que pour un observateur qui se déplace, un objet très proche semble bouger par rapport aux objets lointains. Si aucun instrument à son époque n'avait la précision nécessaire pour mesurer ce mouvement apparent (et le suspense durera pendant les 20 siècles suivants !), Aristarque avait l'intuition que la distance des étoiles devait être très grande, et donc ce mouvement apparent trop petit. C'est d'ailleurs cette grande distance, et donc ce grand univers qui lui donnerait un plus grand nombre de grains de sable, qui avait fait choisir à Archimède le système d'Aristarque au lieu du système géocentrique alors privilégié.

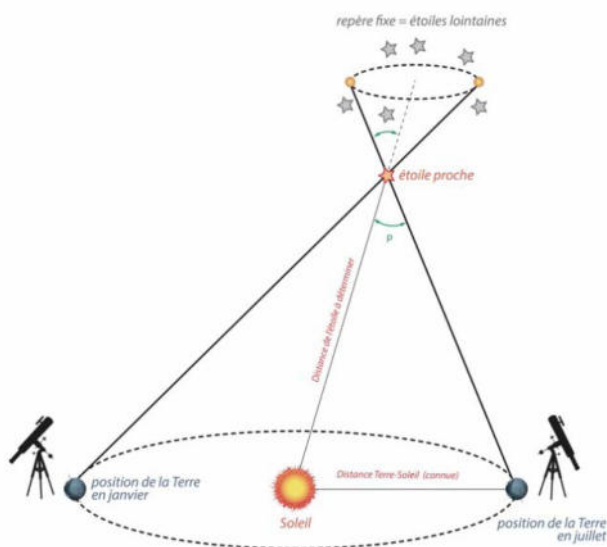
Comme dit le *Petit Prince*, « pour les uns, qui voyagent, les étoiles sont des guides. Pour d'autres, elles ne sont rien que de petites lumières. Pour d'autres qui sont savants, elles sont des problèmes ». Et ces problèmes sont considérables. Pour savoir de quoi sont faites les étoiles, et pour connaître l'univers dans lequel on se trouve, la première étape consiste à déterminer à quelle distance se trouvent ces étoiles. Il faut également connaître cette distance pour pouvoir estimer à quelle vitesse ces objets se déplacent sur le plan du ciel. Par ailleurs, si l'on veut connaître les caractéristiques physiques des étoiles d'un certain type donné, il faut connaître leur luminosité intrinsèque, mais on n'a accès qu'à leur éclat apparent qui diminue avec le carré de sa distance. La luminosité intrinsèque des étoiles d'un même type serait pourtant bien utile, car elle permettrait à son tour de déterminer la distance des galaxies extérieures où on voit ce type d'étoiles. Bref, pour connaître la dimension de l'univers visible, la distance des étoiles proches est une donnée indispensable... qui est hélas extrêmement difficile à estimer.

¹ « Les Étoiles fixes ne sauraient être moins éloignées de la Terre que de vingt-sept mille six cent soixante fois la distance d'ici au Soleil, & si vous fâchiez un Astronome, il les mettrait encore plus loin. » *Entretiens sur la pluralité des mondes*. Par Monsieur De Fontenelle, 1750, cinquième journée.

² Le plus grand nombre de la Grèce antique, une myriade = 10 000.

³ *L'arénaire*, Archimède.

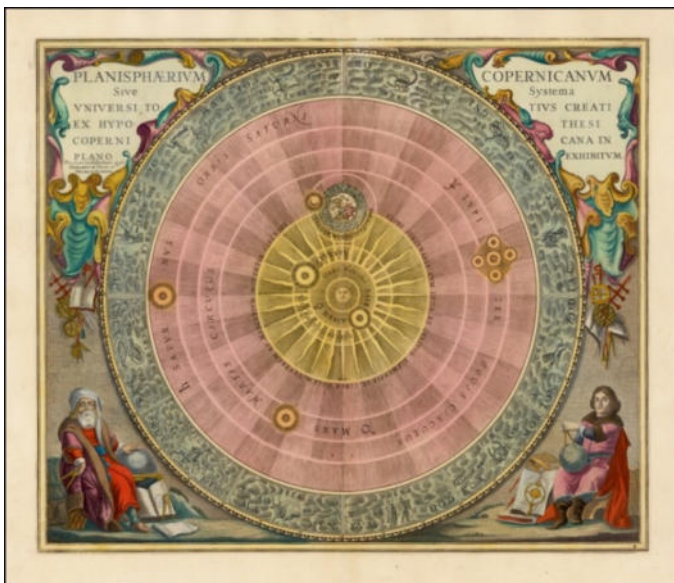
Même en observant attentivement le ciel, et ce n'est pas faute d'avoir essayé, il n'y a aucun moyen évident de déterminer la distance des étoiles : on ne peut mesurer que des angles. On en revient donc à l'idée de déduire la distance d'une étoile par l'angle formé par le déplacement apparent d'une étoile sur le ciel dû au mouvement de la Terre ; cet angle est nommé « parallaxe » annuelle, du grec *Parállaxis*, « altération ». Si l'on connaît cet angle ainsi que la distance de la Terre au soleil, on obtient en effet l'équivalent d'un triangle rectangle dont un angle et la base seraient connus, donnant ainsi accès à la hauteur du triangle : la distance du soleil à l'étoile. La parallaxe explique l'unité physique « parsec », contraction de par[allaxe]-sec[onde] : un parsec est la distance d'un corps céleste qui aurait une parallaxe annuelle d'une seconde de degré. La parallaxe est donc une donnée fondamentale car c'est à la fois la seule mesure directe de la distance des étoiles, donc de la dimension de l'univers visible, et la preuve du mouvement de la Terre autour du soleil.



La mesure de la parallaxe annuelle d'une étoile proche consiste à mesurer la différence de position apparente de celle-ci lorsque la Terre occupe deux positions opposées de son orbite autour du Soleil.

Dans l'Antiquité, la représentation du monde soutenue par un des grands philosophes grecs Aristote (384-322 av. J.-C.) est composée d'une Terre au centre entourée de sphères contenant la Lune, le Soleil, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne et enfin de la sphère des étoiles fixes. Tandis que le monde sublunaire est instable et imparfait, le monde supralunaire est éternel et parfait. Suivant Aristote, Ptolémée (90-168) compile toutes les données astronomiques connues à son époque et formalise la théorie des épicycles afin de modéliser

le mouvement des planètes. Calculant le rayon de chacune des sphères des planètes puis de la sphère des fixes, il obtient des étoiles à très précisément 5 myriades de myriades et 6946 et un tiers de myriades de stades (100 millions de kms). Inutile de préciser que dans son cas, comme dans celui d'Archimède, la précision du nombre masque les hypothèses hasardeuses faites pour y parvenir.



Harmonia Macrocosmica, 1660, Andreas Cellarius. Description du système de Copernic, celui-ci étant représenté en bas à droite. À gauche, Aristarque de Samos, le premier savant de l'antiquité connu pour avoir imaginé un système héliocentrique et des étoiles très lointaines.

Jusqu'au 16ème siècle, c'est le modèle de Ptolémée qui prévaut. Et c'est pendant une Renaissance qui fourmille d'idées que naît Nicolas Copernic (1473-1543). Astronome ayant lu les différents traités de ses illustres prédécesseurs, au courant des idées contrintuitives d'Aristarque, il s'était déjà aperçu à l'âge de 24 ans de la faillibilité du système ptoléméen en mesurant le diamètre

de la lune, pleine et à un quartier. Avec les épicycles de Ptolémée, la Lune aurait dû s'éloigner ou s'approcher de la Terre suivant ses phases et ainsi changer de dimension apparente ; cependant, en

mesurant précisément la durée de l'occultation de l'étoile Aldébaran par la lune, aucune différence ne lui était apparue. Cela a probablement contribué à murir sa vision révolutionnaire. Enfin, si le mouvement de la Terre explique le mouvement rétrograde des planètes, l'absence de changement dans la « sphère des fixes » a pour conséquence que les étoiles devaient se trouver à des distances considérables.

À la fin du XVI^{ème} siècle, Tycho Brahe (1546-1601) est l'un des derniers astronomes à travailler sans lunette mais il perfectionne ses instruments jusqu'à obtenir des précisions excellentes. Certain de ces précisions, le fait qu'il n'arrive pas à mesurer la parallaxe d'une seule étoile l'amène à considérer que celles-ci devraient alors se situer à plus de 700 fois la distance du soleil à Saturne, la planète la plus lointaine connue à l'époque. Une distance paraissant si absurdement grande que les étoiles devraient être gigantesques, et que Copernic ne pouvait avoir raison. Mais ses mesures montraient que Ptolémée non plus, le conduisant à introduire sa propre théorie géocentrique où les planètes tourneraient autour du soleil mais où soleil et lune tourneraient autour de la Terre, le tout entouré par les étoiles.

Successeur de Tycho, et armé de ses excellentes observations, Johannes Kepler (1571-1630), découvre les lois des mouvements des planètes. Il évalue la distance de la sphère des étoiles fixes à 4 millions de fois le rayon du soleil. Il était en correspondance avec Galilée (1564-1642) qui avait tourné sa lunette vers le ciel, et, sachant mieux lire dans l'univers, ce « vaste livre constamment ouvert devant nos yeux », avait annoncé en 1610 que la Voie lactée est en réalité un ensemble constitué d'étoiles indiscernables à l'œil nu. Faute de pouvoir mesurer des parallaxes, Galilée mentionne dans son *Dialogue* deux méthodes alternatives. La première considère que les étoiles sont à différentes distances et que cette distance peut être estimée à partir de leur rayon apparent. Il trouve que le diamètre angulaire de l'étoile Vega est 360 fois plus petit que le diamètre apparent du soleil, donc que l'étoile est à 360 ua (unité astronomique, distance de la Terre au soleil) si les étoiles sont similaires au soleil.

Dans son livre posthume, *Cosmotheoros*, Christian Huygens (1629-1695) décrit comment il a été amené en 1686 à calculer la distance des étoiles afin de prouver, avec une « conception du monde beaucoup plus grandiose », que les étoiles ne reflètent pas la lumière du soleil, mais brillent par elles-mêmes. Il place une plaque percée d'un petit trou au bout d'un tube dirigé vers le soleil, et diminue la dimension des trous jusqu'à ce que l'éclat du soleil lui apparaisse similaire à celui de Sirius la nuit. Le rapport entre le diamètre du trou et le diamètre apparent du soleil indique alors à quelle distance il faudrait éloigner le soleil pour qu'il brille comme Sirius, et obtient 27664 ua.

Dans le cadre de ces méthodes alternatives, Huygens avait eu un précurseur en la personne de l'astronome écossais James Gregory (1638-1675), utilisant en 1668 l'éclat de Jupiter pour déterminer que Sirius devait se trouver à 83190 unités astronomiques. Son idée originale, améliorée par Isaac Newton (1643-1727) en 1686, était la suivante : une planète reflète le soleil et son éclat dépend donc de sa réflectivité, de la luminosité du soleil, de la distance du soleil à la planète et de cette planète à la Terre. Choisisant Saturne là où Gregory avait utilisé Jupiter, disposant de meilleures estimations des distances dans le système solaire, Newton compare l'éclat relatif de Sirius et de Saturne et en déduit que Sirius devait se trouver à environ un million d'unités astronomiques.

La bonne réponse, que l'on connaît maintenant, est 545 000 ua, et on voit que Newton avait enfin trouvé le bon ordre de grandeur. Par ailleurs, Sirius étant la plus brillante des étoiles, les autres devaient donc se trouver à des distances encore plus considérables, augmentant d'autant la dimension de l'univers. On voit cependant les limites de ces méthodes, qui reposaient sur plusieurs hypothèses de calcul, comme par exemple que toutes les étoiles seraient semblables au soleil... ce qui empêchait donc de découvrir qu'elles ne l'étaient pas !

La quête des parallaxes par de nombreux savants continuait cependant de plus belle et l'astrométrie allait engranger plusieurs résultats indirects. C'est d'abord Edmond Halley (1656-1742), connu pour avoir déterminé la période de la comète éponyme, qui s'aperçut en 1718 que les étoiles Aldébaran, Arcturus et Sirius s'étaient déplacées, en comparant leurs positions avec celles de l'Almageste de Ptolémée, 18 siècles plus tôt. Les étoiles avaient donc chacune leur « mouvement propre », fournissant le coup de grâce à cette « sphère des fixes » qui avait prévalu depuis Aristote.

Peu après, James Bradley (1693-1762) s'était lui aussi mis en tête de mesurer des parallaxes. Avec l'aide de Samuel Molyneux qui avait solidement attaché son quadrant à sa cheminée, il voulait mesurer au zénith la parallaxe de Gamma Draconis dont le mouvement semblait suspect. Les mesures commencent le 3 décembre 1725, et, deux semaines après avoir mis l'étoile en mesure, elle avait déjà un mouvement... trop rapide donc, et hélas pas dans le sens prévu ! Il faudra deux ans à Bradley pour en comprendre la raison, et la légende dit que l'illumination vint en observant le mouvement du fanion d'un bateau virant de bord sur la Tamise. Un épisode de la vie quotidienne permet également de comprendre : quand il pleut et que l'on est immobile, il suffit de tenir son parapluie à la verticale ; mais si l'on se met à courir, il vaut mieux l'incliner vers l'avant si l'on veut éviter d'être mouillé : les gouttes ne semblent plus venir de la verticale. Ainsi, le mouvement que Bradley avait mesuré était dû au fait que la Terre avait bougé pendant que la lumière de l'étoile arrivait sur son instrument, et donc que la position apparente de l'étoile n'était plus celle qui était attendue. Bradley avait découvert ce que l'on nomme « l'aberration de la lumière ». Römer, astronome danois à l'Observatoire de Paris, avait montré en 1676, en notant le retard des éclipses du satellite Io de Jupiter, que la vitesse de la lumière est finie. Bradley venait donc de trouver une valeur approchée de cette vitesse. De plus, certes il n'avait pas mesuré de parallaxes, mais il venait de *prouver* expérimentalement que c'est bien la Terre qui se mouvait autour du centre du système solaire.

Un demi-siècle plus tard, William Herschel (1738-1822), l'excellent organiste de Bath, et astronome amateur fabriquant lui-même ses fabuleux télescopes, découvre Uranus en 1781, la première planète découverte depuis l'Antiquité. Comme il l'écrira vers la fin de sa vie, « la connaissance de la construction du ciel a toujours été l'objet ultime de (ses) observations ». Faute de parallaxes, et donc de distances d'étoiles, il avait tenté en 1785 de déterminer la forme de notre Galaxie à partir de dénombrements d'étoiles dans toutes les directions, de la même manière que, isolé au milieu d'une forêt dont on voudrait découvrir la forme, on pourrait tenter de compter les arbres dans toutes les directions en supposant que la lisière est plus proche là où le nombre d'arbres est plus faible. Jusqu'au début du XX^{ème} siècle, son modèle d'une Voie lactée contenant tout l'univers visible et avec un soleil proche de son centre restera en vigueur. Aussi curieux que cela puisse paraître, c'est il y a moins d'un siècle seulement que ce modèle fut sérieusement contesté et que l'on établit que les autres galaxies étaient extérieures à la nôtre et le soleil loin du centre de la Voie lactée.

Mais revenons aux parallaxes. Dès 1782, Herschel avait mis en mesure des couples d'étoiles : il suivait ici la seconde idée originale de Galilée pour rechercher des parallaxes : si les étoiles sont comme le soleil et ont donc toutes la même luminosité intrinsèque, alors une étoile brillante est plus proche de nous qu'une étoile faible ; donc son mouvement parallactique devrait être plus grand ; il suffit alors de mesurer la position relative des deux étoiles au cours de l'année pour obtenir une parallaxe différentielle. Mais Herschel laisse longtemps cette question de côté pour aborder d'autres études et découvrir des satellites de deux planètes, la forme de notre Galaxie, le rayonnement infrarouge, etc. Il ne reprend ses mesures qu'en 1803 pour découvrir que, dans plusieurs de ses couples, les étoiles ont tourné l'une autour de l'autre. Les parallaxes sont restées insaisissables, mais en revanche il a la confirmation de ce qui était pressenti : la loi de la gravitation de Newton est universelle, valable dans le système solaire comme pour des étoiles lointaines.



Herschel mourra sans mesurer de parallaxes, et il faudra attendre 1838, après de nombreuses fausses annonces de plusieurs astronomes pour que les progrès de l'instrumentation et le soin de Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) permettent de mesurer puis de confirmer la première parallaxe stellaire.

Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846), le premier à avoir obtenu rigoureusement la distance d'une étoile. Crédit : Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

On aura compris que les progrès instrumentaux ont fait découvrir entre les 17ème et 19ème siècles des phénomènes d'amplitude de plus en plus petite jusqu'à ce que les parallaxes stellaires deviennent enfin mesurables. Le point important est que cette longue recherche a conduit à la découverte d'autres phénomènes sans aucun rapport mais tout aussi importants scientifiquement, ce que l'on nomme la sérendipité, et une parfaite illustration de l'importance de financer la recherche fondamentale.

Une fois le graal obtenu, les mesures vont se multiplier. Cependant, au début du XXème siècle, on ne connaît les parallaxes que d'une quarantaine d'étoiles sur les quelques centaines de milliards d'étoiles de notre Galaxie, et ce nombre atteint péniblement quelques milliers au début des années 1960 ; parmi celles-ci, seulement 300 étoiles avaient une précision meilleure que 10%. Pire, les valeurs obtenues par les différents observatoires sont rarement en accord. Autant dire que l'ensemble des mesures de distances stellaires étaient indirectes et que les progrès nécessitaient un changement à la fois quantitatif (plus d'étoiles) et qualitatif (avec une meilleure précision).

C'est le professeur Lacroute de l'Observatoire de Strasbourg qui suggère en 1966 une solution au CNES, l'agence spatiale française : effectuer les mesures astrométriques depuis l'espace. Au sol, un même instrument ne permet pas d'observer tout le ciel, est soumis à la pesanteur et aux irrégularités du mouvement terrestre, et ses observations sont dégradées par la turbulence atmosphérique et ne peuvent observer qu'un petit champ. En revanche, les avantages des observations depuis l'espace sont nombreux : avec la méthode proposée, l'astrométrie globale, il s'agit de mesurer avec un instrument unique et automatisé les déplacements des étoiles non seulement dans des petits champs mais aussi relativement à d'autres champs du ciel angulairement très éloignés.

Le premier satellite astrométrique, Hipparcos, est accepté par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) en 1980 puis lancé depuis Kourou le 8 août 1989 ; il balaie le ciel entre novembre 1989 et mars 1993, fournissant 39 mois de données utiles. C'est à une jeune astronome de l'Observatoire, Catherine Turon, que l'ESA avait confié en 1981 la responsabilité du Consortium européen chargé de la sélection scientifique des 118 000 étoiles à observer. C'est donc à Meudon que le catalogue a été bâti puis qu'une partie du traitement astrométrique final a été réalisé. Avec une précision 50 fois meilleure que celle possible depuis le sol (un millième de seconde de degrés), *Hipparcos* a révolutionné l'astrométrie et représenté un outil décisif pour l'astrophysique. C'est aussi à Meudon que plusieurs résultats scientifiques ont été obtenus, comme par exemple la structure et la distance des amas d'étoiles proches, et également la découverte de transits d'exoplanètes.

Plus de deux mille articles scientifiques de la communauté internationale ont utilisé le catalogue *Hipparcos*, depuis l'estimation de la densité locale d'étoiles à l'amélioration des indicateurs indirects de distance, en passant par la cinématique d'étoiles de différents types, la découverte d'une ancienne fusion d'une galaxie avec la Voie lactée, un meilleur système de référence pour l'étude de la rotation terrestre, la réconciliation de l'âge des plus vieilles étoiles avec l'âge de l'univers, etc. Une science très ancienne, l'astrométrie, qui étudie les positions, distances et vitesses des objets célestes, des sujets *a priori* peu attrayants, est donc redevenue un outil fondamental pour l'astrophysique.

Avant même les résultats d'Hipparcos, la nécessité et la possibilité d'aller plus loin semblaient évidentes. Les progrès techniques pouvaient permettre non seulement d'améliorer considérablement la précision astrométrique, mais aussi d'observer un nombre considérable d'étoiles. Ces deux aspects, fondamentaux pour améliorer nos connaissances, donnèrent naissance au projet Gaia. Accepté le 12 octobre 2000 comme Pierre Angulaire du programme scientifique de l'ESA, le satellite a été lancé par une fusée Soyouz, depuis Kourou comme Hipparcos, le 19 décembre 2013.



Octobre 2013 : test du déploiement du bouclier du satellite Gaia à Kourou (Guyane française) avant son lancement. Crédits : ESA-M. Pedoussaut.

La mission Gaia a été construite sur plusieurs idées forces. Pour connaître notre environnement, il faut effectuer le relevé le plus complet possible du ciel afin d'éviter des biais de sélection ; le souci, c'est que certaines étoiles intrinsèquement lumineuses peuvent être vues à grande distance, mais d'autres sont intrinsèquement faibles et ne sont donc visibles qu'à courte distance. Pour couvrir la plus large gamme possible d'étoiles, le satellite doit donc être capable de détecter les objets faibles, la contrainte étant qu'ils doivent être assez brillants pour être repérés, avec un signal bien supérieur au bruit de mesure. Gaia observe ainsi le plus grand nombre possible d'objets, plus d'un milliard d'étoiles, mais également un demi-million de petits corps du Système Solaire, de quasars et de galaxies, bref, tout ce qui est assez brillant pour ses détecteurs. Car, naturellement, plus grand est le relevé, plus il y a de chances d'observer des phénomènes rares, des objets particuliers.

Seule la mesure de la parallaxe annuelle permet d'obtenir la distance des objets célestes sans avoir à faire d'hypothèses sur leur nature physique. Et cette distance permet en retour de déterminer la luminosité intrinsèque des étoiles et leur âge. Le but est bien entendu d'étudier des étoiles à tous les types d'évolution afin de pouvoir les modéliser, et améliorer la physique stellaire. Le hic, c'est que les étoiles peuvent rester très longtemps dans certains stades d'évolution, et passer très rapidement (au sens astronomique !) dans d'autres phases. À nouveau, la seule solution : observer un nombre considérable d'étoiles afin d'en observer dans toutes les phases d'évolution possibles.

Par ailleurs, la connaissance de la distance est évidemment indispensable pour pouvoir étudier la structure de notre Galaxie. Malheureusement, pour une précision des parallaxes donnée, l'incertitude relative sur la distance croît avec cette distance : on obtient précisément la position des objets proches mais la position des objets lointains est de plus en plus floue. La contrainte scientifique essentielle pour la mission Gaia était donc d'assurer une précision extrême pour les mesures afin de pouvoir mesurer une partie significative de la Galaxie. Typiquement il s'agissait d'obtenir environ 10% de précision relative pour des objets au centre de notre Galaxie, soit des parallaxes précises à 10 milliardièmes de seconde de degré près pour les plus brillants objets ! Il est difficile de réaliser concrètement ce à quoi correspond cette précision : c'est deux cent millions de fois plus petit que la dimension angulaire de la lune ; c'est l'angle formé par l'épaisseur d'un cheveu vu à 1000 kilomètres ! L'évolution depuis Hipparcos est saisissante : 15 000 fois plus d'objets et, pour les objets brillants, avec une précision 100 fois meilleure que son prédécesseur.

Les mesures astrométriques permettent d'obtenir la parallaxe mais également la position et le mouvement propre de ces objets, et tout ceci permet de calculer par exemple les orbites d'astéroïdes dans le système solaire ou celles d'étoiles dans la Galaxie. Enfin presque, car à vrai dire, si l'on obtient bien la position des étoiles en trois dimensions, il manque cependant une dimension pour obtenir leur vitesse : celle le long de la ligne de visée. Pour obtenir cette vitesse radiale, un spectrographe est nécessaire, qui utilise l'effet Doppler-Fizeau (celui qui fait que la sirène d'une

ambulance est plus aigüe lorsqu'elle se rapproche, et plus grave lorsqu'elle s'éloigne). Enfin, il s'agit de pouvoir caractériser les étoiles observées avec leurs caractéristiques physiques comme la température, qui peut être obtenue en mesurant la couleur ; deux prismes sont utilisés pour ce faire. On voit ainsi comment le satellite Gaia a été imaginé : un véritable observatoire astronomique en orbite, avec des instruments astrométriques, photométriques et spectroscopiques.

La complexité, cependant, provient de la nécessaire stabilité absolue des instruments : la moindre variation thermique produirait des observations complètement faussées. Pour en comprendre la raison, il suffit de traduire la précision angulaire de Gaia en termes d'écart entre les deux principaux miroirs à bord du satellite : c'est de l'ordre de l'atome ! Bien sûr, il est impossible d'assurer la stabilité interne à ce niveau, mais il faut au moins posséder à bord l'instrumentation capable de modéliser les déplacements. Bien entendu, il faut aussi limiter les vibrations et utiliser des matériaux de pointe. C'est une entreprise française qui a ainsi usiné la structure et les miroirs en carbure de silicium, une céramique aussi robuste qu'un métal mais deux fois plus légère et, surtout, se dilatant très peu avec la température. Enfin, pour minimiser les corrections de trajectoire du satellite et assurer sa stabilité thermique, celui-ci est situé sur une trajectoire très stable autour du soleil à 1,5 million de kilomètres de la Terre et suivant celle-ci dans son déplacement annuel. En tournant sur lui-même continûment, il observe plusieurs fois l'ensemble du ciel dans ses deux champs de vue, avec en moyenne 70 observations par étoile à la fin de la mission. Jusqu'à présent, il a déjà accumulé plus d'un billion de mesures individuelles !

Les premiers résultats de Gaia commencent déjà à tomber. Une nouvelle galaxie satellite de la Voie lactée et cachée derrière elle, a été découverte, une très jeune exoplanète a été pesée, la trace de la collision il y a 10 milliards d'années d'une autre galaxie avec la Voie lactée a été mise en évidence. Depuis le 25 avril 2018, date de la deuxième publication du catalogue, 900 travaux scientifiques ont déjà utilisé ces données.

Ainsi l'Europe, tant décriée dans d'autres domaines, montre son volontarisme en termes de politique spatiale. Hipparcos et Gaia, les seuls satellites astrométriques existants, sont européens. La construction a permis à l'ESA (l'agence spatiale européenne) d'inciter des retombées industrielles dans un maximum de nations européennes. La France peut aussi se flatter d'avoir eu Matra Espace comme maître d'œuvre pour Hipparcos, et Astrium (maintenant Airbus Defence and Space) comme maître d'œuvre de Gaia, indiquant le rôle central qu'elle a joué dans les deux cas.

Au plan scientifique, l'investissement de l'Observatoire et plus généralement de la communauté française est aussi très important pour Gaia, le quart des scientifiques impliqués étant français. Ce n'est pas nouveau ; dans cette longue histoire de la mesure de la dimension de l'univers visible, de nombreux chercheurs de l'Observatoire ont été impliqués depuis le début, avec Cassini, Rømer, Arago, Foucault, Fizeau, et de nombreux autres.

L'astrométrie apprend la patience car les échelles de temps de tels projets sont considérables. Les résultats définitifs de Gaia seront obtenus à partir de 2023, soit 30 ans après la première définition de la mission. De la même manière, il s'était écoulé 31 ans entre la première proposition d'Hipparcos et la publication finale de ses résultats. Maintenir des équipes scientifiques compétentes sur le long terme est donc fondamental mais constitue une vraie gageure politique.

Même si ces durées peuvent paraître longues, il apparaît qu'à l'échelle de l'histoire de l'humanité, la compréhension de l'univers proche est incroyablement récente et essentiellement due aux progrès technologiques. En définitive, comme le remarquait Anatole France, « ce qui est admirable, ce n'est pas que le champ des étoiles soit si vaste, c'est que les humains l'aient mesuré. »

Frédéric Arenou

Pour en savoir plus : <https://gaia.obspm.fr/>

Cataclysmes et explosions cosmiques explorés en rayonnement gamma : un prototype de télescope inédit élaboré à l'Observatoire de Meudon

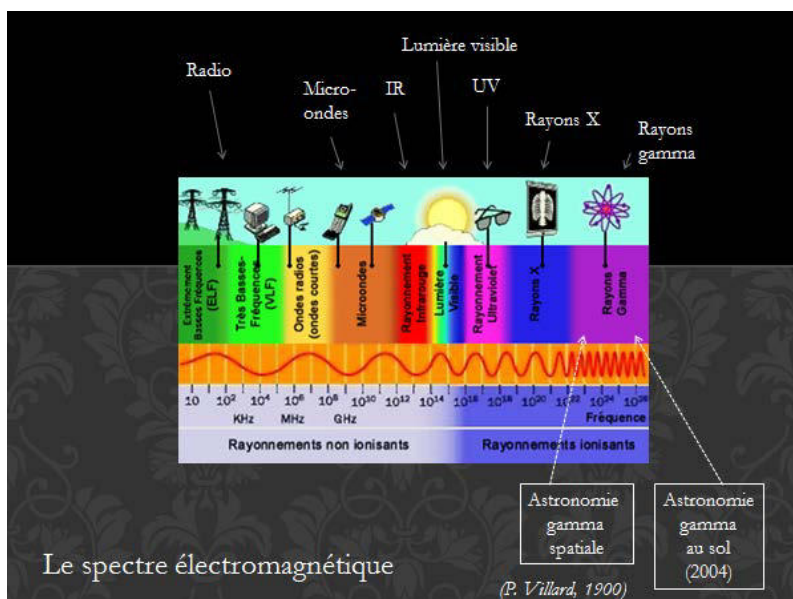
Un télescope de type nouveau a récemment vu le jour sur le site de l'Observatoire à Meudon. Il s'agit d'un prototype préparant la nouvelle génération d'instruments de l'astronomie gamma au sol. Inauguré fin 2015 juste après l'obtention de ses premières détections d'événements sur le ciel, il est entré dès 2016 en phase intensive d'optimisation et de validation qui vient maintenant de se terminer, après plusieurs campagnes d'observations et de tests.



A gauche, derniers réglages avant une première nuit d'observation en novembre 2015. A droite, le télescope lors de tests mécaniques à Meudon courant 2017. @Observatoire de Paris.

Une nouvelle branche de l'astronomie est née

Après des millénaires d'observation du ciel en lumière visible, les astronomes ont pu à partir du XX^{ème} siècle élargir leur champ d'investigation en recueillant à l'aide d'instruments dédiés de multiples rayonnements en provenance du cosmos dans les domaines de plus basses énergies - radio - dès les années 30, puis infrarouge - et dans les domaines de plus hautes énergies - ultraviolet, X, puis gamma.

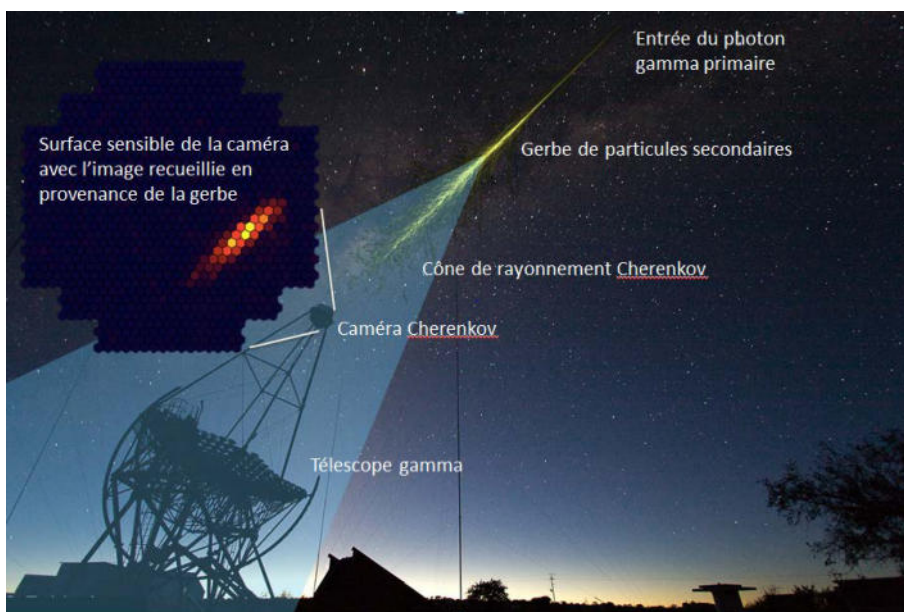


La lumière visible est une onde électromagnétique (ou photon), vibration des champs électrique et magnétique, de même nature que les ondes radio, micro-ondes, infrarouge, ultraviolet, rayons X et gamma, mais dans différentes gammes de fréquence et d'énergie (adapté du site www.astronoo.com). La découverte des rayons gamma est due au français Paul Villard, analysant en 1900 le rayonnement du radium qui venait d'être découvert et isolé par Marie et Pierre Curie.

Les tout premiers rayons gamma « mous » (de moindre énergie) venant de l'univers ont été détectés à partir de satellites lancés dans les années 60. En effet, leur observation ne peut se faire que depuis l'espace car ces photons gamma « mous » sont absorbés par l'atmosphère et indétectables depuis le sol. Le satellite Fermi, opérationnel depuis 2008, a désormais réussi à identifier des milliers de sources cosmiques émettant dans ce domaine d'énergie.

Les photons gamma « durs » du domaine du TeV¹ situé à l'extrémité du spectre électromagnétique, de quelques dizaines à quelques centaines de TeV, sont quant à eux des milliers de milliards de fois plus énergétiques que la lumière visible et peuvent être étudiés depuis le sol.

Lors de leur entrée dans l'atmosphère terrestre, les rayons gamma de très haute énergie, de même que les rayons cosmiques, interagissent avec les noyaux atomiques de l'air et créent une cascade de particules secondaires qui forment une « gerbe atmosphérique ». Ces particules très énergétiques se déplacent à des vitesses supérieures à celle de la lumière dans le gaz atmosphérique et leur gerbe émet un pinceau de lumière fugace, ténue et bleutée, dénommée « lumière Cherenkov » du nom de son découvreur à Moscou dans les années 30. Ces éclairs de lumière d'une dizaine de nanosecondes² peuvent alors être recueillis par des télescopes gamma depuis le sol, équipés de grands miroirs et de caméras à électronique très rapide, composées d'une mosaïque de photomultiplicateurs. Cette technique a permis l'exploration de la dernière fenêtre astronomique aux très hautes énergies. Une petite poignée de sources³ a d'abord été détectée par une expérience américaine, puis confirmée et complétée par d'autres expériences dans le monde, en particulier une expérience française installée dans les Pyrénées. En 2004, c'est l'expérience H.E.S.S.⁴, majoritairement européenne, qui a effectué la véritable ouverture à ces très hautes énergies dès le lancement de ses opérations, suivie quelques années après par d'autres équipes. Ces réseaux de télescopes gamma ont révélé la grande richesse du cosmos observé dans le domaine des rayons gamma « durs », en réunissant un échantillon de plus de deux cents sources cosmiques dont la détection est désormais fermement confirmée au TeV.



Un des télescopes du réseau H.E.S.S. opérationnel en Namibie, expérience à laquelle participe l'Observatoire. L'astronomie Cherenkov parvient à détecter de façon indirecte les rayons gamma de très haute énergie depuis le sol. L'analyse combinée des images de gerbes recueillies par les télescopes gamma d'un même réseau permet d'identifier la nature de la particule initiale et de remonter de façon précise à l'énergie et à la direction d'arrivée des photons gamma

primaires. L'image de la source cosmique émettrice est ainsi reconstruite peu à peu par l'accumulation de milliers d'événements Cherenkov (adapté de <https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>).

¹ 1 TeV = 1 Tera-électron-Volt = 1000 milliards d'électron-Volt

² 1 nanoseconde = un milliardième de seconde

³ Dont la nébuleuse du Crabe, publiée en 1989, puis deux noyaux actifs de galaxies de type « blazar » Mrk 421 et Mrk 501, dans les années 90.

⁴ H.E.S.S. = High Energy Stereoscopic System

Les rayons gamma extrêmes nous révèlent les centrales énergétiques du cosmos et nous permettent de sonder l'espace-temps

La détection de rayons gamma au TeV indique la présence de particules relativistes dans les sites cosmiques à l'origine des rayonnements. Ces particules ont généralement été accélérées au voisinage de zones très énergétiques comme l'environnement des étoiles à neutrons et des trous noirs, dans de grands écoulements de matière, par les chocs et la turbulence qui en résultent. C'est ainsi que les télescopes gamma étudient en priorité l'univers énergétique, transitoire, et cataclysmique avec l'observation de sources comme les restes de supernovae ou les pulsars et leurs nébuleuses, toutes résidus d'explosions stellaires, ou comme les quasars et noyaux actifs de galaxies et leurs grands jets de matière relativiste dans l'espace extragalactique. Il est vraisemblable que la prochaine génération d'instruments Cherenkov au sol parviendra également à observer des événements cosmiques cataclysmiques comme les sursauts gamma, et aussi les coalescences d'étoiles à neutrons ou de trous noirs récemment mis en évidence par les détecteurs d'ondes gravitationnelles, les plus grandes explosions jamais observées par l'humanité depuis le Big Bang.

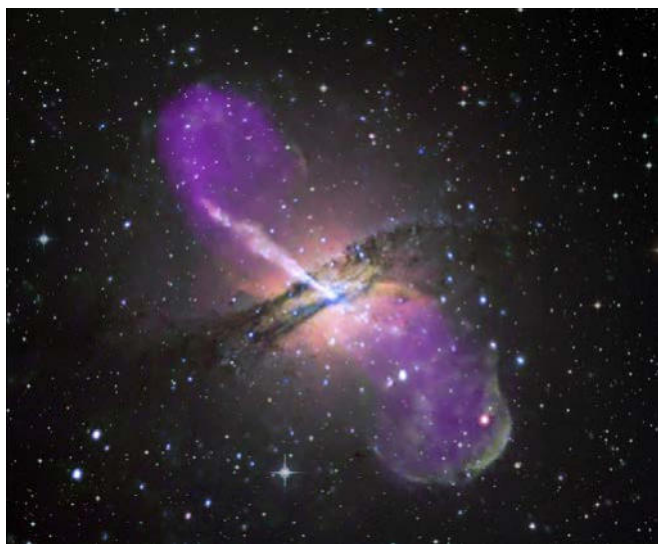


Image composite multi-longueur d'onde (X, radio, optique) de la radiogalaxie Centaurus A, source de rayons gammas « durs » située à plus de treize millions d'années-lumière, montrant un grand jet de matière (pinceau blanc-bleuté dirigé vers le haut à gauche) émis de son centre actif à partir de l'environnement du trou noir super-massif. Crédit : X: NASA/CXC/CfA/R.Kraft et al., radio : NSF/VLA/Univ.Hertfordshire/M.Hardcastle; optique : ESO/VLT/ISAAC/M.Rejkuba et al.

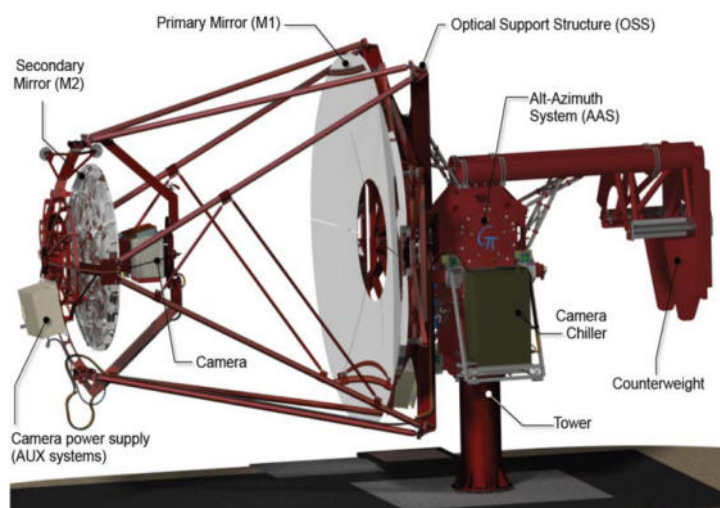
Par ailleurs, l'étude de la propagation des rayons gamma extrêmes le long des lignes de visée, depuis les sources cosmiques émettrices jusqu'à la Terre, offre la possibilité d'explorer les propriétés des espaces galactique et extragalactique traversés. C'est ainsi que des

contraintes sur le rayonnement infrarouge diffus baignant l'espace intergalactique peuvent être déduites, avec des conséquences pour les modèles cosmologiques de notre univers, et que des signatures potentielles d'effets de gravité quantique, un des grands défis de la physique théorique de ce siècle, peuvent être recherchés dans les signaux reçus de sources gamma variables comme les pulsars ou les noyaux actifs de galaxies. De plus, suivant la nature effective et les propriétés réelles de la matière noire, des signatures indirectes de sa présence pourraient également être trouvées dans le domaine du TeV, résolvant ainsi une question absolument fondamentale de l'astrophysique contemporaine. C'est pourquoi, après les succès de la génération actuelle des télescopes gamma au sol, la conception et la construction d'instruments plus sensibles de prochaine génération sont apparues comme un enjeu important de notre décennie.

Une équipe de l'Observatoire développe un prototype inédit de télescope gamma

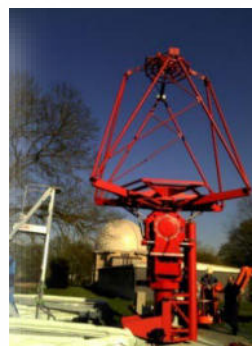
Une équipe de chercheurs et ingénieurs de l'Observatoire s'est engagée dès 2011 dans un projet de télescope gamma de type Schwarzschild-Couder, dont le concept général à deux miroirs proposé par Karl Schwarzschild avait été optimisé au siècle dernier par André Couder, alors astronome opticien à l'Observatoire de Paris. Pour diverses raisons, et en particulier les difficultés techniques rencontrées à l'époque pour la fabrication des miroirs de géométrie complexe, asphérique et non-conique, nécessaires pour le système optique, ce type de télescope n'avait encore jamais été construit en astronomie. En 2007 et 2008, ce concept à deux miroirs est apparu potentiellement très bien adapté

aux besoins de l'astronomie gamma au sol, car il peut simultanément offrir une bonne qualité d'image sur un grand champ de vue, et des dimensions réduites pour la structure mécanique et la caméra, favorables à d'excellentes performances instrumentales. Il était donc important de lancer un travail de prototypage afin de confirmer et valider l'intérêt de ce concept novateur en astronomie Cherenkov avant de le proposer pour la prochaine génération d'instruments comme CTA¹.



Ce modèle de télescope gamma élaboré à Meudon montre les différentes composantes de l'instrument. Le miroir primaire a un diamètre de 4 mètres, le miroir secondaire de 2 mètres. La caméra a été conçue et fabriquée par une collaboration internationale partenaire de l'équipe meudonnaise. @Observatoire de Paris.

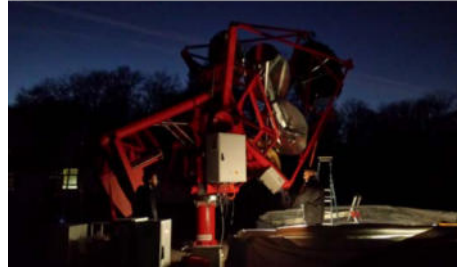
Le projet a été rendu possible grâce au soutien de la Région Ile-de-France, du CNRS et de l'Observatoire de Paris. Après l'étude de conception, la fabrication de la structure mécanique et des miroirs a été lancée par appel d'offre auprès des industriels. Le prototype a finalement pu être assemblé en moins d'une semaine sur le site de Meudon en 2015.



*Trois étapes de l'assemblage sur le site de l'Observatoire à Meudon au printemps 2015.
@Observatoire de Paris.*

En novembre 2015, le prototype de télescope a été équipé de la caméra scientifique pour une campagne d'observation et a réussi l'obtention de sa première lumière Cherenkov sur le ciel nocturne de Meudon, malgré les lumières de l'agglomération parisienne et des conditions rendues difficiles par la présence d'une lune brillante et de quelques nuages épars. Il s'agissait là de la toute première lumière Cherenkov jamais obtenue par un télescope de type Schwarzschild-Couder. C'était également le premier prototype du consortium international CTA à capter ses premières gerbes atmosphériques sur le ciel.

¹ CTA = Cherenkov Telescope Array



A gauche, l'inauguration du télescope le 1^{er} décembre 2015, après sa première lumière Cherenkov. A droite, l'instrument au crépuscule, juste avant le démarrage d'une nuit d'observation à Meudon.

Le miroir primaire a été segmenté en six pétales pour minimiser le coût du prototype. @Observatoire de Paris.

Depuis début 2016, les campagnes de tests et d'observation se sont succédées pour parvenir à la validation du prototype et à l'optimisation du concept. Pour accompagner les observations, une petite station météo installée sur le site permet de recueillir divers paramètres atmosphériques et de mesurer la brillance du fond de ciel nocturne. Fin 2018, le projet meudonnais a pu être proposé comme contribution au projet CTA, qui prévoit la construction prochaine d'un très grand réseau de télescopes Cherenkov sur deux sites de haute qualité astronomique, au Chili et dans l'île de La Palma aux Canaries. Le télescope sera aussi utilisé à Meudon comme instrument d'observation, banc de tests et outil pédagogique.

Un projet international ambitieux vise à construire un réseau de plusieurs dizaines de télescopes gamma dans l'hémisphère sud et dans l'hémisphère nord pour approfondir notre connaissance du cosmos aux très hautes énergies

Le projet CTA se propose de construire le plus grand réseau de télescopes gamma au monde pour offrir un observatoire d'astronomie Cherenkov ouvert à toute la communauté scientifique, qui couvrira un vaste domaine d'énergie, de 20 GeV à 300 TeV. Le but est d'améliorer toutes les performances par rapport aux instruments actuels, en particulier la sensibilité par un facteur 10, mais aussi les résolutions angulaire, spectrale et temporelle, la précision astrométrique et l'extension du domaine spectral. Il sera possible de faire des observations profondes de cibles spécifiques, des suivis de sources variables, des relevés de larges régions du ciel, ou de réagir à des alertes pour l'étude de phénomènes transitoires. Des cartes, des spectres et des courbes de lumière de haute qualité seront obtenues et les données rapidement mises à disposition de l'ensemble de la communauté.



Vue d'artiste du projet CTA de grand réseau de télescopes Cherenkov dans l'hémisphère sud au Chili. Des dizaines de télescopes de

différentes tailles sont prévues, dont 4 télescopes de 23m de diamètre, 25 télescopes de 12m, et 70 télescopes de 4m qui exploreront la partie la plus extrême du spectre électromagnétique encore peu connue au-delà de 5 TeV et jusqu'à 300 TeV. @CTA, site web du projet international : www.cta-observatory.com.

Le consortium CTA rassemble à ce jour 31 pays et plus de 1400 scientifiques répartis dans plus de 200 instituts, avec une forte composante européenne et en particulier française. L'Observatoire est impliqué depuis les débuts dans le projet CTA par les travaux qui sont conduits à Meudon sur la physique des sources cosmiques de haute énergie et sur les futures données de haut niveau attendues de CTA, et par la construction du prototype de télescope gamma présenté dans cet article.

Hélène Sol

L'Univers et les trous noirs

Je voudrais vous faire connaître ici quelques exemples de recherches effectuées à l'Observatoire de Meudon sur deux sujets importants, les trous noirs et la cosmologie (c'est-à-dire l'étude de l'Univers dans son ensemble). Vous allez me dire : pourquoi ces deux sujets, qu'ont-ils en commun ? Eh bien, ils font appel tous les deux à une même théorie, celle de la relativité générale. Proposée par Albert Einstein il y a plus d'un siècle, elle a traversé avec succès toutes les vérifications qu'on a pu en faire, allant jusqu'à des précisions de dix millionièmes de milliardièmes pour certaines !

Les trous noirs

Tout le monde le sait maintenant, un trou noir est un objet si compact que sa gravité empêche la matière et le rayonnement de s'en échapper¹.

De même que sur la Terre, on appelle « horizon », la ligne derrière laquelle les bateaux disparaissent sur la mer, on appelle « horizon du trou noir », la surface (non matérielle) d'où plus rien ne peut sortir. Les trous noirs ne peuvent pas émettre de rayonnement, c'est pourquoi on dit qu'ils sont « noirs ». Contrairement à ce qu'on pourrait imaginer, ce sont des objets extraordinairement simples, les plus simples de tous les objets célestes ! Ils sont définis seulement par deux quantités : leur rotation et leur masse. (En toute rigueur, il faudrait aussi ajouter leur « charge électrique », mais ils ne pourraient en acquérir une qu'en capturant des flots de particules chargées positivement ou négativement). On montre que la taille d'un trou noir est proportionnelle à sa masse. Ainsi un trou noir ayant la masse du Soleil et qui ne tourne pas a un rayon de trois kilomètres, et un trou noir un milliard de fois plus massif un rayon de un milliard de kilomètres, soit à peu près la taille du Système Solaire. Quant à la Terre, si elle était un trou noir (mais il y a peu de chance qu'elle le devienne un jour), elle aurait la taille d'une grosse tête d'épingle.

Vous pensez sans doute que les trous noirs sont des objets purement théoriques, et qu'ils n'existent pas. Détrompez-vous, car on les observe ! Mais comment, direz-vous, puisqu'ils ne « rayonnent » pas ? En fait, ce n'est pas le trou noir lui-même que l'on observe, mais la matière qui tombe sur lui. Elle ne « tombe » pas à proprement parler, elle s'en approche en décrivant une spirale, et lorsqu'il y a beaucoup de matière, celle-ci prend la forme d'un disque, qui rayonne à cause de la friction subie par les atomes dans leur périple. Pensez à une météorite qui s'enflamme en arrivant dans l'atmosphère terrestre et que nous voyons sous la forme d'une belle étoile filante. Cependant, la météorite a une vitesse de vingt ou trente kilomètres par seconde, tandis que la matière tourne dans le disque près du trou noir avec une vitesse proche de celle de la lumière, soit environ 10.000 fois plus vite. Le rayonnement qu'elle émet juste avant de s'abîmer définitivement dans le trou noir est donc incroyablement plus intense que celui d'une étoile filante, et nous pouvons l'observer même lorsque le phénomène se produit très loin, aux confins de l'Univers. C'est ainsi que l'on arrive à voir les **quasars**, qui rayonnent autant que des centaines de milliers de milliards de Soleil grâce à un gigantesque trou noir en train d'avaler l'abondante matière qui les entoure.

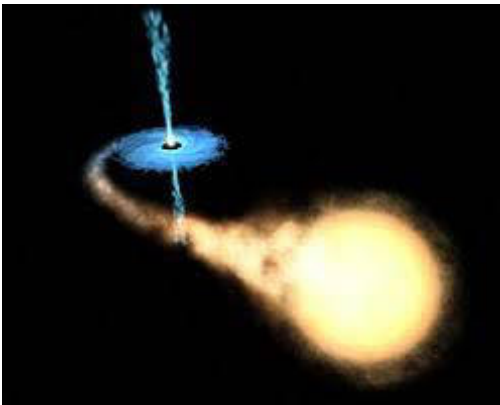
¹ À l'exception des hypothétiques très petits trous noirs, dont l'astrophysicien Stephen Hawking a montré qu'ils pouvaient s'évaporer. Ils seraient de la taille d'une particule, et leur masse ne serait « que » celle d'une montagne comme l'Everest ! Ils auraient pu être créés au moment du Big Bang.



Figure 1 : Vue d'artiste d'un quasar. Il possède un trou noir entouré d'un disque lumineux d'où jaillissent deux jets symétriques formés de particules très rapides.

Il existe deux sortes de trous noirs. Ceux que l'on appelle « stellaires », qui ont une masse de l'ordre de quelques fois la masse du Soleil ; et ceux que l'on appelle « supermassifs », qui ont des masses d'un million à un milliard de fois la masse du Soleil.

Les **trous noirs stellaires** se forment lorsqu'une étoile massive a épuisé tout le combustible qui lui permet de rester en équilibre. Car on sait depuis le vingtième siècle que les étoiles vivent en transformant par des réactions nucléaires leurs éléments « légers », comme l'hydrogène, le carbone et l'oxygène, en éléments plus lourds comme le fer¹. Lorsque l'étoile a épuisé son combustible nucléaire, elle s'effondre sur elle-même en quelques secondes, tandis que ses couches extérieures sont expulsées violemment : c'est ce que l'on nomme une **supernova**. Certains d'entre vous ont peut-être eu la chance, s'ils sont allés dans l'hémisphère Sud, d'observer celle qui a explosé en 1987 et que l'on a continué à voir pendant de longs mois. La partie de l'étoile qui s'est effondrée devient alors un corps très compact, soit une « étoile à neutrons² » d'une masse voisine de celle du Soleil et d'une dizaine de kilomètres de rayon (une cuillère à café d'une telle étoile pèse un milliard de tonnes...), soit un trou noir, plus massif et à peine plus compact. Si le trou noir fait partie d'un couple d'étoiles, ce qui se produit assez souvent, il attire et avale l'atmosphère de sa compagne, et ce mécanisme



produit à profusion des rayons X que captent des télescopes placés sur des satellites (car le rayonnement X ne traverse pas l'atmosphère).

Figure 2 : Image d'artiste représentant un couple d'étoiles dans lequel l'une est un trou noir et l'autre une étoile géante. La première attire l'atmosphère de l'autre, qui forme un disque lumineux avant de s'engouffrer dans le trou noir. Par ailleurs, un jet est éjecté symétriquement depuis le centre du disque. Il est constitué de particules se déplaçant presque à la vitesse de la lumière.

¹ Et même en or ! La fameuse transmutation dont rêvaient les alchimistes existe donc bel et bien, mais à l'intérieur des étoiles, où la température atteint des millions et même des milliards de degrés.

² Les neutrons sont des particules constitutives des noyaux des atomes, neutres électriquement comme leur nom l'indique. Ils s'amalgament à l'intérieur des étoiles à neutrons en formant une sorte de superfluide.

En ce qui concerne les « **trous noirs supermassifs** », on en détecte un dans le cœur de toutes les grandes galaxies. Outre les quasars déjà mentionnés, qui se situent dans des galaxies très lointaines, il existe près de nous des « **Noyaux Actifs de Galaxies** » qui contiennent également des trous noirs géants, mais moins lumineux que les quasars car ils ont moins de matière à se mettre sous la dent (Figures 3 et 4). Ainsi, le centre de la Voie lactée en contient un dont la masse est quatre millions de fois celle du Soleil.



Figure 3 : Une « galaxie à noyau actif ». Elle possède un noyau brillant qui rayonne grâce à un trou noir géant situé au centre. Crédit Nasa, télescope Hubble.

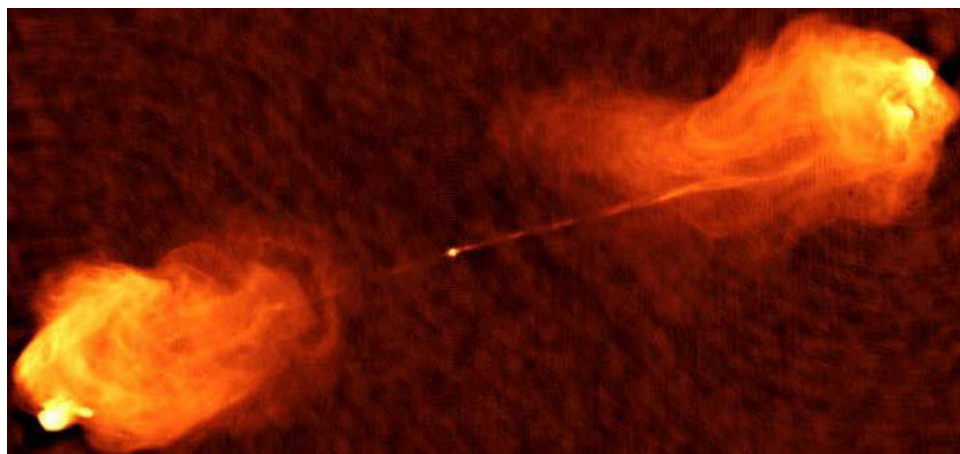


Figure 4 : Un autre exemple de noyau actif de galaxie. Il s'agit d'une observation dans le domaine radio (les couleurs sont donc inventées). Au centre de la galaxie Cygnus A se trouve un trou noir géant dont l'environnement émet deux jets symétriques. Ceux-ci sortent de la galaxie et vont donner de l'énergie à deux immenses lobes qui s'étendent jusqu'à des centaines de milliers d'années-lumière de la galaxie (elle-même étant un petit point au centre de l'image). Crédit NRAO.

Les **trous noirs stellaires** et le phénomène associé de **supernova** font l'objet de recherches intenses dans une équipe de l'Observatoire, où ont été développés des logiciels permettant de simuler sur des ordinateurs l'explosion et l'effondrement d'une étoile massive. Il faut faire appel pour cela au formalisme de la relativité générale et à de la physique sophistiquée concernant les particules qui constituent les étoiles très compactes. Ces recherches ont permis de calculer la façon dont deux trous noirs en rotation l'un autour de l'autre se rapprochent pour fusionner en donnant un seul trou noir. Ces deux thèmes ont connu récemment un succès presque inattendu (mais espéré depuis trente ans !) avec la découverte en 2015 des **ondes gravitationnelles**. Ces ondulations de l'espace-temps qui se déplacent à la vitesse de la lumière avaient été prédites par Einstein, et des instruments étaient développés depuis trente ans dans le but de les observer. Elles l'ont été pour la première fois en septembre 2015. Elles provenaient de la fusion de deux trous noirs de quelques dizaines de fois la masse du Soleil, et cet événement a été suivi par plusieurs autres semblables (Figure 5). Ils ont apporté la **preuve définitive de l'existence des trous noirs**.

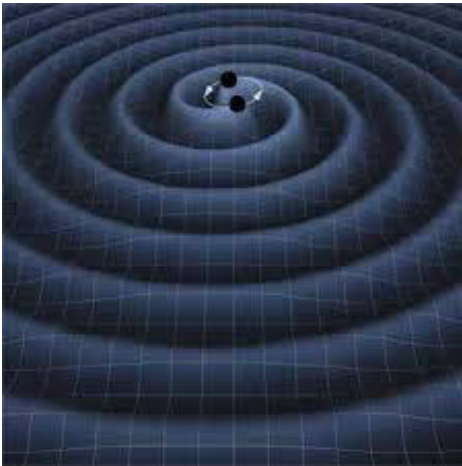


Figure 5 : Ondes gravitationnelles créés par deux trous noirs en rotation l'un autour de l'autre. Ces deux trous noirs se rapprochent et finissent par fusionner en émettant une énorme bouffée d'ondes gravitationnelles que l'on perçoit sur Terre bien qu'ils soient très éloignés.

Enfin un événement s'est produit en août 2017, cette fois beaucoup plus long que les précédents (une centaine de secondes contre une fraction de seconde) et l'analyse des données a indiqué que les masses des deux objets qui ont fusionné étaient de l'ordre de la masse du Soleil, ce qui correspond à des étoiles à neutrons. Ces résultats extraordinaires, auxquels ont participé des scientifiques de

l'Observatoire, illustrent le potentiel d'une astronomie nouvelle, qui va apporter dans l'avenir des réponses à des questions fondamentales que l'on se pose sur les trous noirs et sur la naissance de l'Univers.

Concernant les **trous noirs supermassifs**, l'un des départements de l'Observatoire est leader international dans les techniques de haute résolution angulaire¹ qui lui ont notamment permis de s'impliquer depuis de nombreuses années dans plusieurs études de l'environnement des trous noirs géants au centre des galaxies. Cela a notamment permis la découverte et la caractérisation du **trou noir central de la Voie lactée**. En collaboration avec des chercheurs allemands, cette équipe a étudié depuis 1992 les mouvements des étoiles gravitant au cœur de la Voie lactée (Figure 6). L'analyse de ces orbites (Figure 7) a permis de déterminer avec précision la masse du trou noir, grâce aux lois qui gouvernent leurs mouvements comme elles gouvernent ceux des planètes autour du Soleil.

Figure 6 : Le centre de la Voie lactée est peuplé d'une multitude d'étoiles cachées à nos yeux par des poussières, et que l'on voit seulement dans l'infrarouge. Le zoom en haut et à droite montre les étoiles plus proches du trou noir, qui se trouve à la position marquée Sgr A*. Crédit : ESO, MPE, S. Gillessen et al.

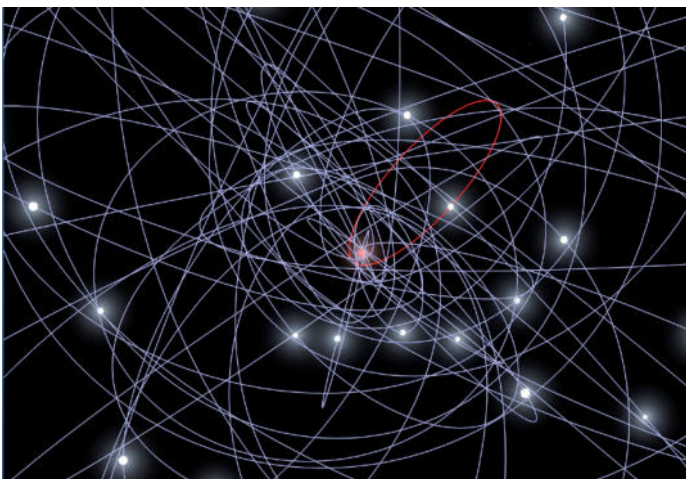
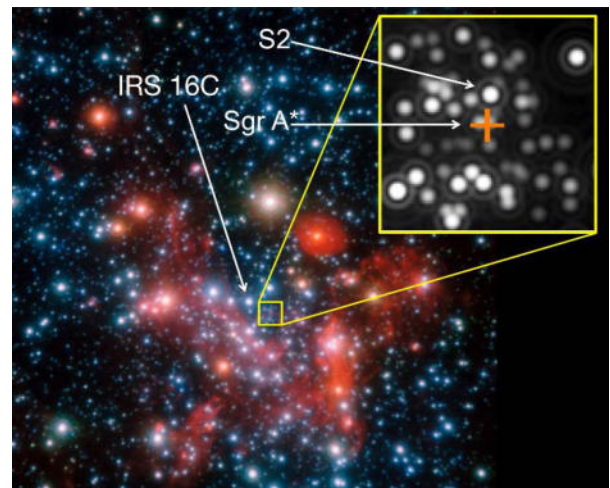


Figure 7 : Cette figure montre les mouvements observés des étoiles orbitant autour du trou noir central de la Voie lactée. Grâce à l'étude spectroscopique couplée avec les mesures des déplacements des étoiles sur le ciel, on peut obtenir leurs vitesses à trois dimensions dans l'espace. Crédit : Max-Planck-Institute für extraterrestrial Physics.

¹ Ce sont des techniques permettant d'observer de très petits détails, même lorsqu'ils sont mélangés par la turbulence atmosphérique.

Figure 8 : La sensibilité extraordinaire de l'Instrument Gravity permet d'observer pour la première fois la matière autour du trou noir central de la Voie lactée, pratiquement au niveau de son horizon. Eso Gravity Consortium/L. Calçada <http://socsi.in/rMIIJ>

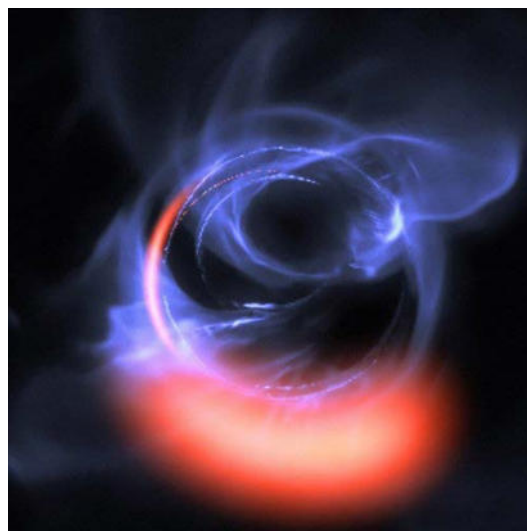


Figure 9 : L'instrument Gravity, dont un chercheur de l'équipe est responsable, couple ensemble par interférométrie les quatre très grands télescopes de l'ESO (Observatoire Européen de l'hémisphère sud), lui donnant la sensibilité et la résolution d'un télescope de 130 mètres de diamètre. Crédit ESO

Gravity a relevé les positions de l'étoile la plus proche du trou noir géant, qui effectue une révolution complète en seize années. Elle est passée en avril 2002 au plus près du trou noir, et y est revenue le 19 mai 2018, où elle a atteint la vitesse énorme de 8 000 kilomètres par seconde ! Notons que le déplacement sur le ciel de cette étoile peut maintenant être détecté d'un jour à l'autre, contre un mois avant Gravity ! Une collaboration d'une centaine de chercheurs de 16 institutions, avec une place très importante de l'Observatoire, vient de montrer que les mesures sont en désaccord absolu avec la gravité de Newton, et confirment les prévisions d'Einstein.

La cosmologie

C'est Einstein qui a eu le premier l'idée en 1917 d'appliquer la relativité générale à la description de l'Univers dans son ensemble. Malheureusement il s'est trompé car il désirait pour des raisons philosophiques que l'Univers fût statique. Quelques années plus tard, un physicien russe, Friedmann, montrait que la solution d'Einstein était instable et que l'Univers devait être en expansion ou en contraction. En 1929, l'américain Hubble découvrait que les galaxies s'éloignent de nous avec des vitesses proportionnelles à leurs distances¹ : c'est la « loi de Hubble », qui ne peut être expliquée que par une expansion de l'Univers tout entier comme le montre la figure 10².

¹ À moins de supposer que nous sommes au centre de l'Univers, ce qui est peu plausible !

² En fait, un jeune cosmologiste belge, l'abbé Lemaitre, fit cette démonstration un peu avant Hubble, ce qui explique que la loi vient d'être rebaptisée « loi de Hubble-Lemaitre ».

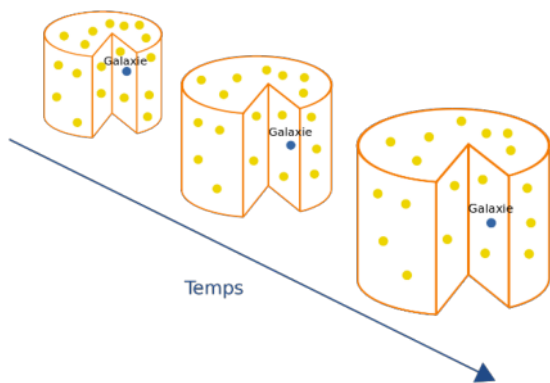


Figure 10 : L'expansion de l'Univers se traduit par une fuite des galaxies à partir de n'importe quel point d'où on le considère.

L'expansion de l'Univers ne fait maintenant plus aucun doute, comme ne fait plus de doute qu'elle a commencé lors de ce que l'on appelle « le **Big Bang** », une sorte d'explosion qui s'est produite il y a 13,8 milliards d'années. Mais son scénario détaillé pose problème. En effet, on a découvert il y a presque cinquante ans que l'Univers contient une matière étrange, que l'on a appelée « **matière noire** », car elle ne rayonne pas comme la matière ordinaire, et elle n'est sensible qu'aux forces de gravitation. On n'a pas encore pu déterminer sa nature, or elle représente les quatre cinquièmes de toute la matière de l'Univers et elle est nécessaire pour expliquer la formation des galaxies et des amas de galaxies ! Mais il y a pire : on a découvert il y a juste vingt ans que l'expansion de l'Univers s'accélère depuis quelques milliards d'années, et on ne sait pas pour quelle raison : une force encore inconnue ? Une constante imposée lors du Big Bang ? Dans l'ignorance où l'on est, on a appelée « **énergie sombre** » la cause de ce phénomène, et cette énergie représente trois quarts de toute l'énergie de l'Univers ! Or sa nature détermine l'histoire future de l'Univers : sous son influence, va-t-il s'épandre de plus en plus rapidement, et nos descendants verront-ils un jour un monde vide, glacé et sans étoile ?

L'un des moyens utilisés actuellement en cosmologie pour résoudre ces problèmes, ce sont les « simulations numériques ». On connaît en effet bien l'état initial de l'Univers grâce au rayonnement qui a été émis lorsque l'Univers est devenu transparent, environ 400 000 ans après le Big Bang¹. On rentre donc dans un ordinateur ces conditions initiales pour un ensemble de « particules » massives de la taille des galaxies, et on étudie leur évolution sous l'effet de la gravité, dans le cadre d'un « modèle » constitué d'énergie sombre, de matière (normale et noire) et d'autres ingrédients. On cherche alors le modèle donnant le résultat le plus proche des observations à l'heure actuelle. Bien entendu, plus on met de « particules » dans la simulation, et plus elle est précise.

Une équipe de l'Observatoire a développé un programme de recherche concernant la nature de l'énergie sombre, au moyen d'une gigantesque simulation numérique. L'équipe a ainsi produit il y a quelques années la plus grosse simulation jamais effectuée à cette époque. Appelée DEUS (Dark Energy Universe Simulation), elle a fait évoluer depuis le Big Bang jusqu'à nos jours 550 milliards de particules, sur un supercalculateur capable de réaliser 2 millions de milliards d'opérations à la seconde. À terme, l'ensemble des simulations prévues devrait nécessiter plus 30 millions d'heures de calcul, bien sûr effectuées en parallèle, faute de quoi il y faudrait près de 3.500 ans. On peut escompter que des progrès sensibles concernant l'énergie sombre en résulteront.

Suzy Collin-Zahn

¹ Il s'agit d'un rayonnement émis il y a environ 400 000 ans, lorsque l'Univers est devenu transparent. On l'observe dans le domaine des « micro-ondes », c'est à dire des ondes électromagnétiques de longueurs d'onde voisines du millimètre, grâce en particulier au satellite Planck.

In memoriam : Christian Bénilan

Christian Bénilan nous a quittés, ses obsèques ont été célébrées le 24 novembre en l'église de l'Assomption de Meudon Bellevue.

Après une carrière libérale, Christian était devenu architecte des bâtiments de France. Il dirigea pendant de nombreuses années le service département de l'architecture et du patrimoine des Hauts de Seine. A ce titre il eut à répondre à la difficile conciliation entre protection du patrimoine construit et naturel et évolution urbaine. Meudon retenait toute son attention à un double titre : en tant que conservateur du domaine national et en tant que résident. C'est à Christian que nous devons le retour des orangers dans l'orangerie, action dans laquelle il joua un rôle majeur qui a rendu sa dignité à cet édifice. Aquarelliste de talent, il ressuscita dans son œuvre de nombreux châteaux d'Ile de France, aujourd'hui disparus. Les hasards de la vie l'avaient par ailleurs conduit à acquérir et à aménager avec quelques amis l'ancienne maison de Charles Guillaud, l'un des pères fondateurs de notre comité.

Toujours à l'écoute de nos remarques, Christian restera dans notre mémoire un interlocuteur compétent et attentif. Que son épouse, sa famille et ses proches soient assurés de toute notre sympathie.

Michel Jantzen



*Château Vieux et Château Neuf à Meudon vers 1720 - aquarelle de Christian Benilan,
<http://christianbenilan.wifeo.com/>*

Informations locales et nouvelles brèves

par Jean-Baptiste Delaporte, Michel Riottot, Michel Jantzen et Yves Terrien
(Consulter aussi notre site www.sauvegardedesitemeudon.com)

Agenda 2019 pour le CSSM (JBD)

Nos trois rendez-vous traditionnels pour l'année 2019 sont fixés :

- l'assemblée générale, le samedi 23 mars à 10 heures,
- l'opération « Forêt propre », le samedi 13 avril après-midi,
- les journées du patrimoine, les samedi 21 et dimanche 22 septembre.

Notez-les dès maintenant dans votre agenda.

Ile Seguin (MR)

Le contentieux entre la ville de Boulogne-Billancourt et quatre associations : Actions-Environnement Boulogne-Billancourt, Boulogne Environnement, Val de Seine Vert et Vivre à Meudon, et des particuliers qui durerait depuis huit ans a donné lieu à un protocole d'accord qui devra être ratifié par la communauté d'agglomération Grand Paris Seine Ouest. Négocié grâce aux efforts du président du Tribunal Administratif de Cergy-Pontoise il se traduit par une constructibilité pour toute l'île limitée à 230 000 m², un jardin public de 15 000 m², 5 percées visuelles et piétonnes de 20 m de large, une hauteur limitée des bâtiments (74 m NGF) et une tour de 96 m NGF plus un comité de surveillance de l'avancée du projet.

Le CSSM déplore, néanmoins, un « paquebot » de 1100 m de long, très massif, dépassant les dimensions de l'ancienne usine Renault et augmentant la densité humaine de ce secteur ce qui va rendre sa gestion extrêmement couteuse (infrastructures, transports, parkings...). Imaginons un événement musical important en fin d'après-midi avec 6000 personnes à la Seine Musicale, la présence des 8000 salariés du Groupe Vinci-Bolloré en activité, et pour le groupe Emerige en pointe amont : les cinémas pleins, une exposition intéressante au centre d'Art contemporain et l'hôtel de 220 chambres complet... On pourrait avoir 20 000 personnes en même temps avec un accès réduit par 3 petits ponts et une passerelle !

Les garages en haut de la rue des Capucins (MJ)

Dans le bulletin 147-148 de septembre 2017 nous évoquions l'état d'abandon de la porte Verte (ou porte Dauphine) rue des Capucins, à cela s'ajoute le lien indigne entre ce monument et les anciens communs de la place Janssen : les immondes garages plantés là il y a environ 60 ans et dont l'état de ruine interdit tout usage. Quelques heures de travail suffiraient pour leur démolition, mais circonstances aggravantes ils sont couverts en amiante ciment. La destruction de ce matériau est aujourd'hui soumise à des règles d'hygiène légitimement contraignantes qui en renchérissent sensiblement le coût.

Qui doit payer ? A débattre entre l'Etat pour l'implantation sur un monument historique et la direction de l'observatoire de Paris affectataire.

Conseils de quartier (YT)

La municipalité a créé des Conseils de Quartier afin de permettre aux habitants de formuler leurs demandes et leurs besoins à l'échelle des quartiers ; leur rôle est uniquement consultatif. Il y a ainsi 5 conseils de quartier (Meudon/Seine, Val-Fleury, Centre, Bellevue et Meudon-la-Forêt) de 30 membres au plus chacun, dont 16 désignés par tirage au sort parmi les candidats individuels. Ces derniers ont ensuite désigné les membres restants parmi les candidats « acteurs locaux ». Il est à noter que la plupart des candidats « acteurs locaux » étaient des membres d'associations meudonnaises plutôt que des commerçants ou artisans, peu nombreux à s'être présentés. La première tâche des conseils a été de mettre des priorités sur les projets présentés individuellement par les meudonnais et qui seront financés par la municipalité pour les projets acceptés.

Le CSSM, qui a accueilli favorablement cette création de Conseils de Quartier permettant une expression directe des meudonnais, a de nombreux membres dans ces assemblées, sauf à Meudon-la-Forêt, où nous avons malheureusement peu d'adhérents.

Visites organisées par le CSSM pour ses adhérents (YT)

Le CSSM organise, à l'intention de ses adhérents, des visites commentées qui rencontrent un franc succès. En 2018, quatre visites ont été tenues :

- l'usine d'incinération d'ordures ISSEANE d'Issy-les-Moulineaux (12/4/2018),
- l'exposition "Dans la forêt de Meudon" au MAHM (2 visites le 23/5/2018 guidées par Franck Devedjian),
- la maison Ferrari à Clamart - fondée par la duchesse Galliera, comme l'Orphelinat St Philippe visité en 2017 (16/10/2018),
- l'exposition "Le Château de Meudon" au MAHM (22/11 et 6/12/2018, guidées par Franck Devedjian).

Ces visites sont faites par groupe de 20-25 personnes (d'où le dédoublement des visites au MAHM, très demandées. Merci Monsieur Devedjian !). Nous poursuivrons bien sûr cette activité en 2019.



La façade ouest du Château, 15 janvier 2013. © Carine Briand.

Page de couverture - Image de fond : Pépinière d'étoiles - Sharpless 29 (Very Large Telescope de l'European Southern Observatory). Vignettes - voir les articles, sauf en haut à gauche : éruption solaire, cliché pris en novembre 2018 à bord de la sonde NASA Parker Solar Probe (superposée sur l'image), première construction humaine à s'approcher si près du soleil ; en bas à gauche : image composite de Saturne, cliché pris à bord de la sonde NASA Cassini au plus près de la planète, montrant les anneaux et leur ombre sur la planète.

Comité de Sauvegarde des Sites de Meudon

Siège Social : 6 avenue Le Corbeiller, 92190 Meudon

Site internet : www.sauvegardesitemeudon.com

Directeur de la Publication : Christian MITJAVILE.

Responsables de la rédaction : Nicole Meyer-Vernet et Jean-François Chappuit

Impression : OnlinePrinters

Dépôt légal : Février 2019 - N° ISSN 1147-1476