

Les Cahiers Clairaut

Automne 2021

Éditorial

Dans ce numéro nous commençons par l'actualité en décrivant les activités du robot Perseverance déposé sur la planète Mars le 18 février dernier. Chaque événement est décrit dans le calendrier martien ; un jour martien (1 sol) dure 24 h 40 minutes de notre calendrier terrestre.

Près du Soleil, la sonde BepiColombo, lancée en 2018, va effectuer son premier survol de Mercure, le 1^{er} octobre prochain. Le nom de cette sonde est un hommage au mathématicien Giuseppe Colombo (1920 – 1984) qui découvrit la méthode dite de « l'assistance gravitationnelle » permettant d'importantes économies d'énergie.

Le thème porte sur les images prises depuis l'espace.

L'étude des rayons X ouvre une fenêtre importante sur l'Univers en donnant accès aux sources très énergétiques. Ces rayons ne peuvent atteindre la Terre car l'atmosphère les absorbe ; il faut donc envoyer dans l'espace des télescopes X, complexes à élaborer.

L'enregistrement des rayons IR permet l'étude des galaxies, des étoiles froides ou des nébuleuses.

Comme nous baignons dans une atmosphère où ces rayons abondent il faut aussi utiliser des télescopes spatiaux. Ce sera par exemple le cas du télescope américain JWST dont on attend avec impatience le lancement.

Pour recueillir les résultats des mesures un important réseau d'antennes est judicieusement disposé à la surface la Terre.

Nous proposons aussi des activités destinées aux élèves des lycées et collèges.

L'article « Kepler confiné » concerne une classe de terminale qui travaille en relation avec l'observatoire Camille Flammarion à Juvisy/Orge. Un autre article concerne des collégiens et s'intéresse à la grande conjonction du 21 octobre 2020 dans le but de «développer leur esprit critique et de distinguer les savoirs des opinions ou des croyances ».

Christian Larcher pour l'équipe

Sommaire

ACTUALITÉS

Article de fond

Perseverance sur Mars, dernières nouvelles

Agnès Cousin p 2

ACTUALITÉS

Article de fond

BepiColombo, premier rendez-vous avec Mercure

Léa Griton p 6

Thème: les images prises depuis l'espace p 10

Article de fond

Images de l'Univers en rayons X

Anne Decourchelle, p 11

Article de fond

Imagerie spatiale dans l'infrarouge et le submillimétrique

Marc Sauvage p 15

Mots croisés

p 21

Article de fond

Les antennes du bout du monde, Deep Space Network

Floriane Michel p 22

Avec nos élèves

Retrouver la position de la sonde Solar Orbiter

Joël Lebras p 27

Lecture d'images prises depuis l'espace p 30

Avec nos élèves

ACTUALITÉS

Les défis Namazu pour travailler sur les missions martiennes de la NASA

Guillaume Coupechoux p 31

Avec nos élèves

Kepler confiné

Myriam Bergon, Jean Guérard p 35

Observation

Le ciel de l'automne 2021

ACTUALITÉS

Visibilité de Mercure et de Vénus à l'automne 2021

Pierre Causseret p 39

Avec nos élèves

La grande conjonction

Olivier Gayraud p 42

Solution mots croisés

p 47

Lecture pour la marquise

Godfried Wendelen

Jean Ripert p 48

PERSEVERANCE SUR MARS

DERNIÈRES NOUVELLES

Agnès Cousin, astronome adjoint à l'IRAP, Toulouse

En février de cette année le robot Perseverance a rejoint son petit frère Curiosity sur Mars.

L'auteure nous décrit la vie de celui-ci durant les premiers sols.

Contexte

Le robot Perseverance, de la mission « Mars2020 », s'est posé le 18 février 2021 dans le cratère Jezero sur Mars. Large de 45 km, le cratère Jezero se trouve sur le bord ouest de la Planitia Isidis, un bassin d'impact géant situé juste au nord de l'équateur martien. Il y a 3,5 milliards d'années, le cratère avait son propre delta fluvial et était rempli d'eau. Le rover a pour but d'étudier les roches et les sédiments de l'ancien lit de lac et du delta fluvial de Jezero afin de caractériser la géologie et le climat passé de la région, mais une partie fondamentale de sa mission est l'astrobiologie, notamment la recherche de signes de vie microbienne ancienne.

Perseverance est équipé non seulement de sept instruments scientifiques, mais aussi du plus grand nombre de caméras jamais envoyées sur Mars, et également d'un système complexe de collecte d'échantillons (c'est le premier de ce type envoyé dans l'espace). Perseverance est donc très bien équipé pour parcourir la région de Jezero à la recherche de vestiges fossilisés d'une ancienne vie martienne microscopique, en prélevant des échantillons en cours de route. La mission du rover Perseverance marque une première étape ambitieuse dans l'effort visant à collecter des échantillons de Mars et à les ramener sur Terre. À cette fin, la campagne Mars Sample Return, planifiée par la NASA et l'ESA (Agence spatiale européenne), permettra aux scientifiques sur Terre d'étudier les échantillons collectés par Perseverance afin de rechercher des signes définitifs de vie passée à l'aide d'instruments trop grands et trop complexes pour être envoyés sur la planète rouge.

Le site d'atterrissage a été baptisé en l'honneur de la défunte auteure de science-fiction Octavia E. Butler. Cette auteure révolutionnaire, originaire de Pasadena, en Californie, a été la première femme afro-américaine à remporter à la fois le prix Hugo et le prix Nebula, et elle a été la première auteure de science-fiction à recevoir une bourse MacArthur. L'endroit où Perseverance a commencé sa mission sur Mars porte désormais le nom d'« Octavia E. Butler Landing ». Les atterrissages sur Mars sont toujours risqués, mais la

NASA a réussi une fois encore son pari. Non seulement l'atterrissage fut réussi, mais en plus des caméras étaient montées sur plusieurs parties de la sonde (au-dessus et au-dessous du robot et du sky crane), permettant de faire un film remarquable (en couleur !) de cet atterrissage.

Aperçu de la phase de tests, trois premiers mois

Dès son atterrissage, Persévérance a pris une image, montrant qu'il avait atterri sain et sauf (figure 1).

Le premier jour sur Mars (jour martien : sol 1), Perseverance a débuté sa phase de recette, en testant chaque instrument, sous-système et sous-programme. Une des premières activités a été de déplier le mât. La phase de test a duré près de trois mois. Une particularité de cette phase concerne le rythme de travail : les ingénieurs et les scientifiques de la mission ont vécu aux horaires martiens, afin de recevoir toutes les données nécessaires avant de planifier de nouveaux tests. La durée d'une journée martienne étant de 24 h 40 min, les horaires de travail se décalaient donc tous les jours ! Nous étions sur Mars !

Le 20 février (sol 2), un premier panorama du site d'atterrissage a été pris par le robot, grâce aux caméras de navigation (NavCams) qui sont situées sur le mât. Le 21 février (sol 3), Perseverance a de nouveau fait pivoter son mât de 360 degrés, afin d'acquérir un panorama haute résolution grâce à l'instrument Mastcam-Z, également situé sur le mât du robot.

Le 2 mars (sol 12) une autre étape importante a été testée : le bras robotique de 2 m de long a été déployé pour la première fois, pendant deux heures. Aucune des cinq autres articulations du robot n'a fléchi, validant ainsi ce test fondamental pour la suite de l'exploration.

Ensuite, le 4 mars (sol 14), Perseverance a effectué son premier déplacement, parcourant 6,5 mètres sur le paysage martien lors d'un test de mobilité.

Durant cette phase de test, un autre objectif était de trouver un endroit relativement plat et sans gros affleurement de



Fig.1. Première image couleur haute résolution renvoyée par les caméras Hazcams situées sous le rover martien Perseverance après son atterrissage le 18 février 2021. Crédit : NASA/JPL-Caltech.

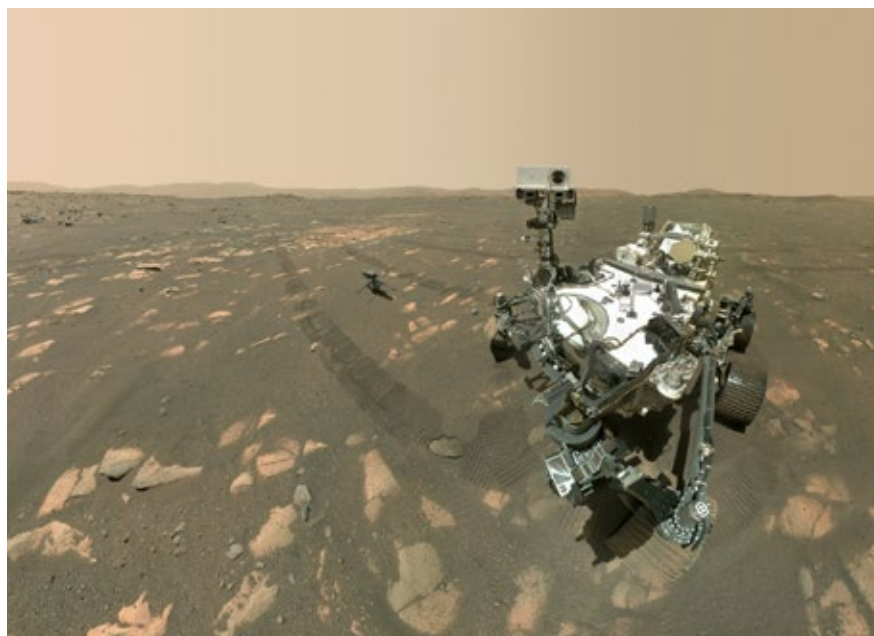
roches afin de libérer le drone Ingenuity (1,8 kg) qui était attaché au ventre du robot. Les équipes ont alors exploité le panorama haute résolution, ainsi que les images satellites, afin de planifier les différentes étapes nécessaires pour libérer puis tester le drone.

Le 21 mars (sol 30), le rover a déployé le bouclier antidébris en graphite composite qui protégeait Ingenuity pendant l'atterrissage. Ensuite, le rover s'est déplacé afin d'arriver à l'endroit sélectionné comme étant le plus plat, et donc le plus simple pour libérer le drone et y effectuer la première campagne de vols.

Une fois Ingenuity déployé, Perseverance a pris un selfie avec lui le 6 avril (sol 46), situés à 4 m d'un de l'autre ! Perseverance a capturé cette image (figure 2) à l'aide d'une caméra appelée WATSON (Wide Angle Topographic Sensor for Operations and eNginneering), qui fait partie de l'instrument SHERLOC (Scanning Habitable Environments with Raman and Luminescence for Organics and Chemicals), situé à l'extrémité

du bras robotique du rover. Le selfie de Perseverance avec Ingenuity a été assemblé à partir de 62 images individuelles prises lorsque le rover regardait l'hélicoptère, puis lorsqu'il regardait la caméra WATSON.

Fig.2. Selfie de Curiosity avec Ingenuity, pris par la caméra Watson, située au bout du bras du robot. Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS.



Le 20 avril (sol 60), un autre test très attendu a été également effectué : l'utilisation de l'instrument expérimental MOXIE (Mars Oxygen In-Situ Resource Utilization Experiment). Cet instrument pourrait ouvrir la voie à la science-fiction : fournir un jour de l'air respirable aux astronautes eux-mêmes. Après une période

de réchauffement de deux heures, MOXIE a commencé à produire de l'oxygène à un taux de six grammes par heure, ce qui est suffisant pour maintenir un astronaute en bonne santé pendant environ dix minutes d'activité normale.



Fig.3. Panorama MastCam des roches autour du robot (« Working site ») Crédit : NASA/JPL-Caltech/ASU/MSSS.

Paysages

Les paysages rencontrés sur le site d'atterrissage sont magnifiques et riches en diversité, montrant des roches relativement plates et claires (appelées « Pavers »), alors que d'autres sont plus en relief et plus sombres (figure 3).

Dans le paysage plus lointain, des gros blocs sombres sont également observables, avec quelques dépôts éoliens. Encore au loin, il est possible d'imager le delta, lieu vers lequel le robot se dirigera d'ici peu. Des images très détaillées des buttes témoins ont également été acquises, mettant en évidence certains environnements de dépôts.

Actuellement, les scientifiques ont une question en tête : les roches observées en place sont-elles sédimentaires (formées au fond du lac par exemple) ou ignées (formées par l'activité volcanique) ? Chaque type de roche raconte une histoire différente.

De plus, certaines roches sédimentaires seront mieux adaptées à la préservation des biosignatures, c'est-à-dire des signes de vie passée. Les roches ignées, quant à elles, sont des horloges géologiques plus précises qui permettent aux scientifiques de créer une chronologie exacte de la formation d'une région. Mais leur distinction n'est pas toujours évidente, et il faut accumuler plusieurs indices, et donc plusieurs analyses afin de pouvoir mettre en avant la meilleure réponse.

Première campagne scientifique

Le 1er juin (sol 100), Perseverance a débuté la phase scientifique à proprement parler de sa mission en quittant le site d'atterrissage Octavia E. Butler, pour se diriger vers le sud. Le rover explore deux unités géologiques uniques dans lesquelles se trouvent les couches les plus profondes (et les plus anciennes) de la roche exposée de Jezero et d'autres caractéristiques géologiques intrigantes. La première unité, appelée « Crater Floor Fractured Rough », est le plancher du cratère de Jezero. L'unité adjacente, appelée « Séítah » (qui signifie « au milieu du sable » en langue navajo), comporte sa part de substratum martien, mais aussi des crêtes, des roches stratifiées et des dunes de sable.

L'objectif de la campagne est de déterminer quels sont les quatre endroits de ces unités qui racontent le mieux l'histoire de l'environnement et de l'histoire géologique du cratère Jezero (figure 4).

Le 6 août dernier, Persévérance a réalisé son premier carottage ! Celui-ci a été réalisé sur une roche type « paver », appelée Roubion. Le forage fait 2,7 cm de diamètre, pour au moins 6 cm de profondeur. L'échantillon prélevé, quant à lui, fait 1,3 cm de diamètre pour 6 cm de profondeur. Il a été mis dans un tube, puis scellé. Cependant, l'équipe investigate en détail car la quantité de matière recueillie semble plus faible que prévue.

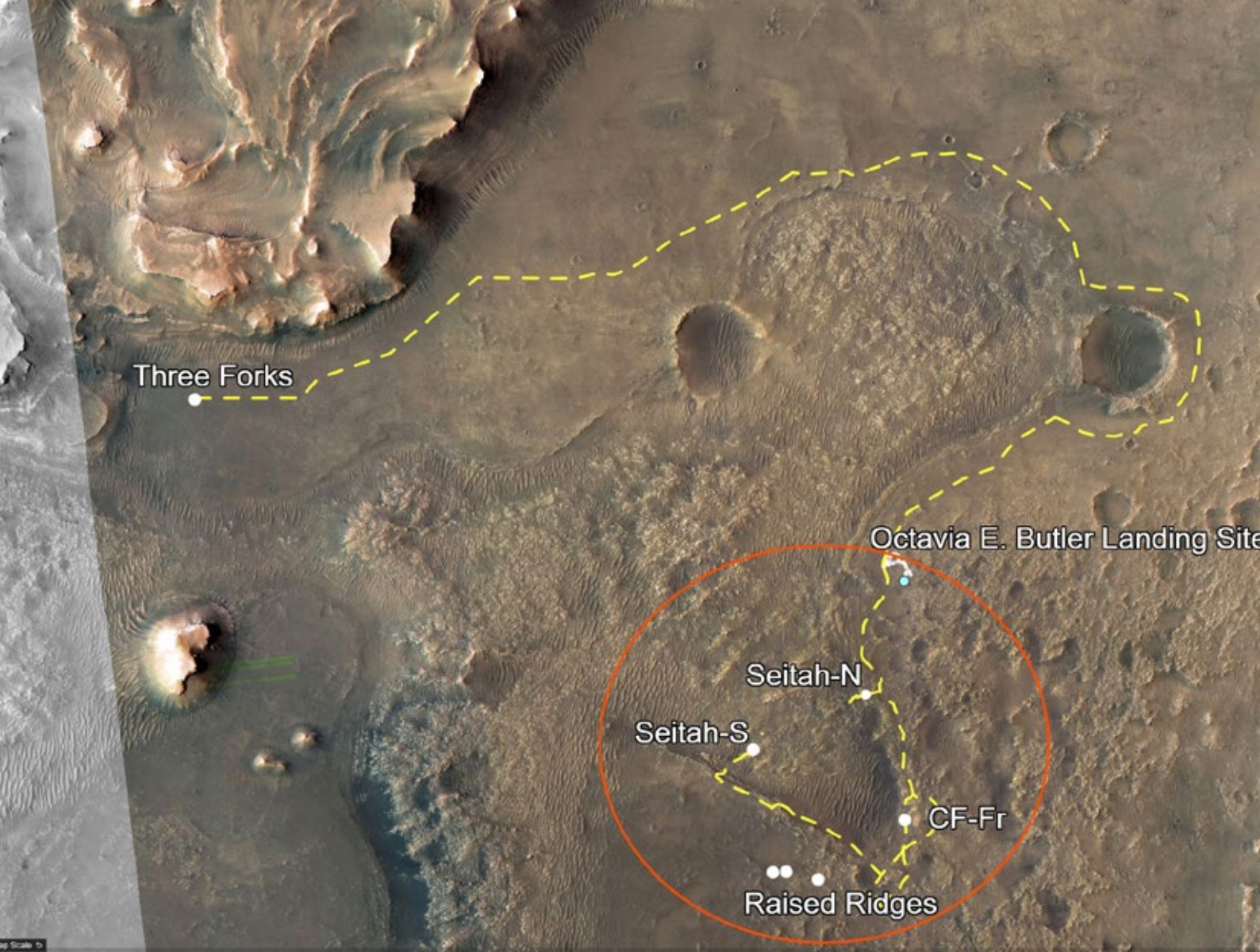


Fig.4. Image annotée du cratère Jezero montrant les itinéraires de la première campagne scientifique de Perseverance (cercle rouge) ainsi que de sa seconde campagne à venir (tirets jaune clair). Crédits : NASA/JPL-Caltech/Université d'Arizona.

Et comment va SuperCam ?

Persévérance bénéficie de l'instrument SuperCam, qui est la contribution française de la mission. L'instrument est un héritage de ChemCam à bord de Curiosity, et de la même manière il utilise la technique du LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) pour analyser la composition élémentaire des roches et des sols de Mars. Mais SuperCam est un couteau suisse de la planétologie ! En plus de la technique du LIBS, il possède un imageur couleur d'ultra haute résolution, et deux techniques permettant d'accéder à la composition minéralogique des roches : la technique du Raman et celle de l'infra-rouge. De plus, SuperCam possède un microphone, afin de faire de la science atmosphérique mais également pour accéder à certains paramètres physiques des roches analysées au LIBS, comme leur dureté par exemple.

Depuis l'atterrissage, de nombreuses images prises à longues distances (plusieurs kilomètres) ont été acquises pour observer les flancs du delta, ainsi que pour aider le projet à la priorisation des objectifs scientifiques.

La première cible analysée par SuperCam s'appelle

Maaz. Il s'agit d'une roche claire et plate, étudiée par la technique du LIBS. Les cibles analysées jusque-là, au site d'atterrissage montrent des compositions variables, allant d'une composante riche en fer et magnésium, vers une composition riche en silicium, aluminium et alcalins.

SuperCam est utilisé chaque sol quand le robot peut dérouler des activités scientifiques. Aujourd'hui, au sol 167, SuperCam a analysé plus de 150 cibles avec au moins une de ces 5 techniques (imageur, LIBS, Raman, VISIR, microphone).

Léa Griton, docteure en astrophysique à l'IRAP,
chercheuse spécialisée en physique des plasmas dans le Système solaire

BepiColombo est une sonde d'exploration spatiale à destination de Mercure. Après trente ans de préparation scientifique et technologique, BepiColombo a quitté la Terre le 19 octobre 2018 depuis le centre spatial guyanais, à Kourou, lors d'un magnifique lancement d'une fusée Ariane. Depuis, sa trajectoire a évolué pour lui permettre de se rapprocher de Mercure à une vitesse raisonnable.

Mercure, une petite planète et de grandes questions

Mercure est une planète difficile d'accès pour un vaisseau spatial : si l'on se dirige vers elle un peu trop vite, il devient difficile de « freiner » pour pouvoir la survoler lentement ou se mettre en orbite autour d'elle, sans tomber sur le Soleil. La présence du Soleil complique les opérations, tant au regard de la vitesse d'approche que des questions de température. *Mariner 10* est la dernière sonde du programme Mariner de la Nasa, et la première qui utilise la technique de l'assistance gravitationnelle pour survoler Vénus et Mercure, entre 1973 et 1975.

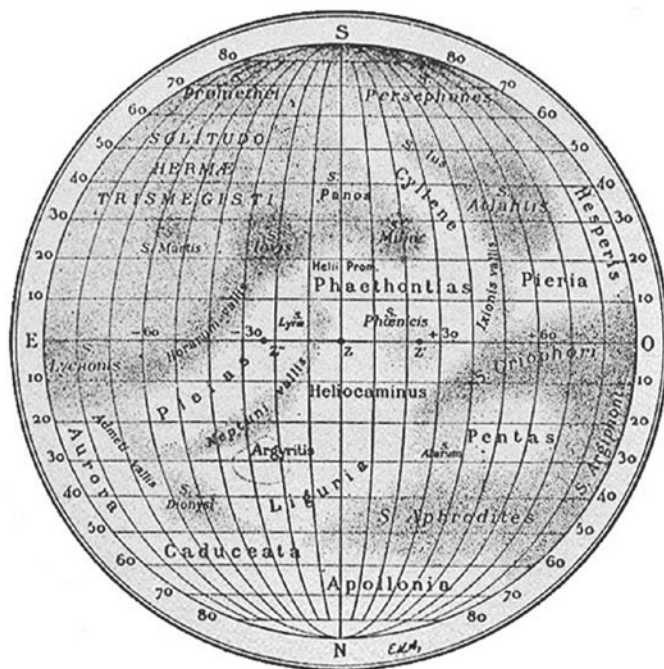


Fig.1. Carte de Mercure par E. Antoniadi (1934). Crédits : Observatoire de Paris.

Un détail important pour la suite de cette histoire : cette technique d'assistance gravitationnelle est alors proposée à la Nasa par un chercheur italien, Giuseppe (Bepi) Colombo, décédé en 1984. *Mariner 10* permet de faire les premières grandes découvertes : la surface de Mercure, photographiée à 40 %, ressemble à celle de la Lune, aucun des deux corps n'ayant a priori d'atmosphère. Mais surtout, *Mariner 10* détecte un champ magnétique suffisant pour entretenir une magnétosphère (comme sur Terre, alors que ni Mars ni Vénus n'en ont), et mesure en outre une densité suggérant que le noyau de Mercure est extrêmement gros par rapport au rayon de la planète (celui de la Lune est très petit). Tout bien considéré, Mercure ne ressemble donc pas tellement à la Lune. Les deux survols de Mercure par *Mariner 10* ne font qu'intriguer encore plus les scientifiques. Comment une planète si petite peut-elle avoir un champ magnétique aussi fort ? Comment réagit-elle à la présence si proche du Soleil ? Quelle est son histoire géologique ? Comment peut-elle nous aider à comprendre le sort des exoplanètes, surtout de celles très proches de leur étoile ? Commence alors une course entre



agences spatiales : laquelle sera la première 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 2004, la sonde *Messenger*, une version plus rapide, moins coûteuse mais également moins prometteuse 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. L'orbite de *Messenger*, qui vise à 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 explorer à la fois la surface de l'hémisphère nord ainsi que l'environnement de la planète et son interaction avec le vent solaire dans l'hémisphère sud.

Cette orbite permet cependant de cartographier la surface entière, même si la résolution spatiale est faible dans l'hémisphère sud, et de relever des indices sur la composition minéralogique de la planète. À 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 plus de 430°C , Mercure est la planète du Système solaire où règne à la surface le plus grand écart de température. On trouve la trace de nombreuses cheminées volcaniques, témoignant d'une importante activité interne passée.

Le champ magnétique mesuré apparaît comme un dipôle (avec un pôle Nord magnétique et un pôle Sud, comme le champ magnétique des aimants ou celui de la Terre), décalé vers l'hémisphère nord par rapport à l'équateur. On

détecte des gaz, observés également depuis la Terre, qui restent accrochés à la planète sans pour autant constituer une atmosphère : on appelle cela une « exosphère », et celle de Mercure apparaît très dynamique. Les découvertes de *Messenger* sont nombreuses, et très bien expliquées (en anglais) sur le site internet de la Nasa dédié à la mission.

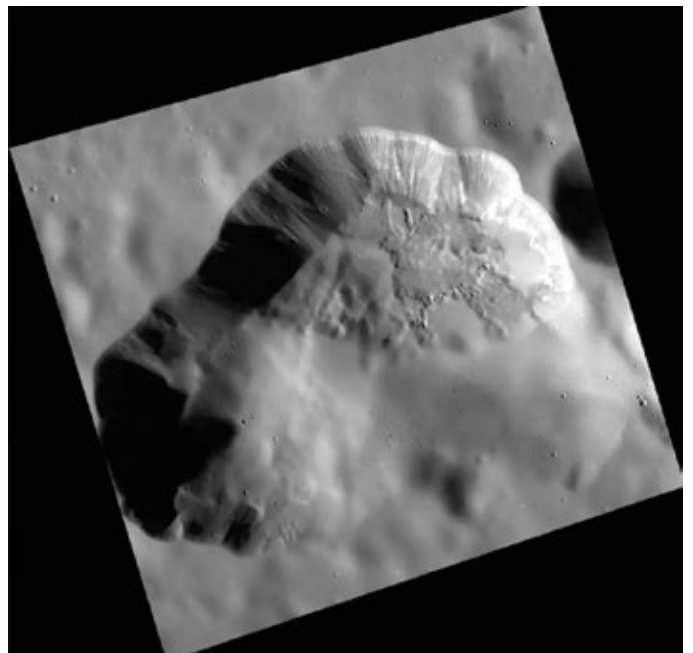


Fig.2. Cheminée volcanique près du cratère Rachmaninov (la diagonale de l'image mesure environ 55 km), crédits : Nasa/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Carnegie Institution of Washington.

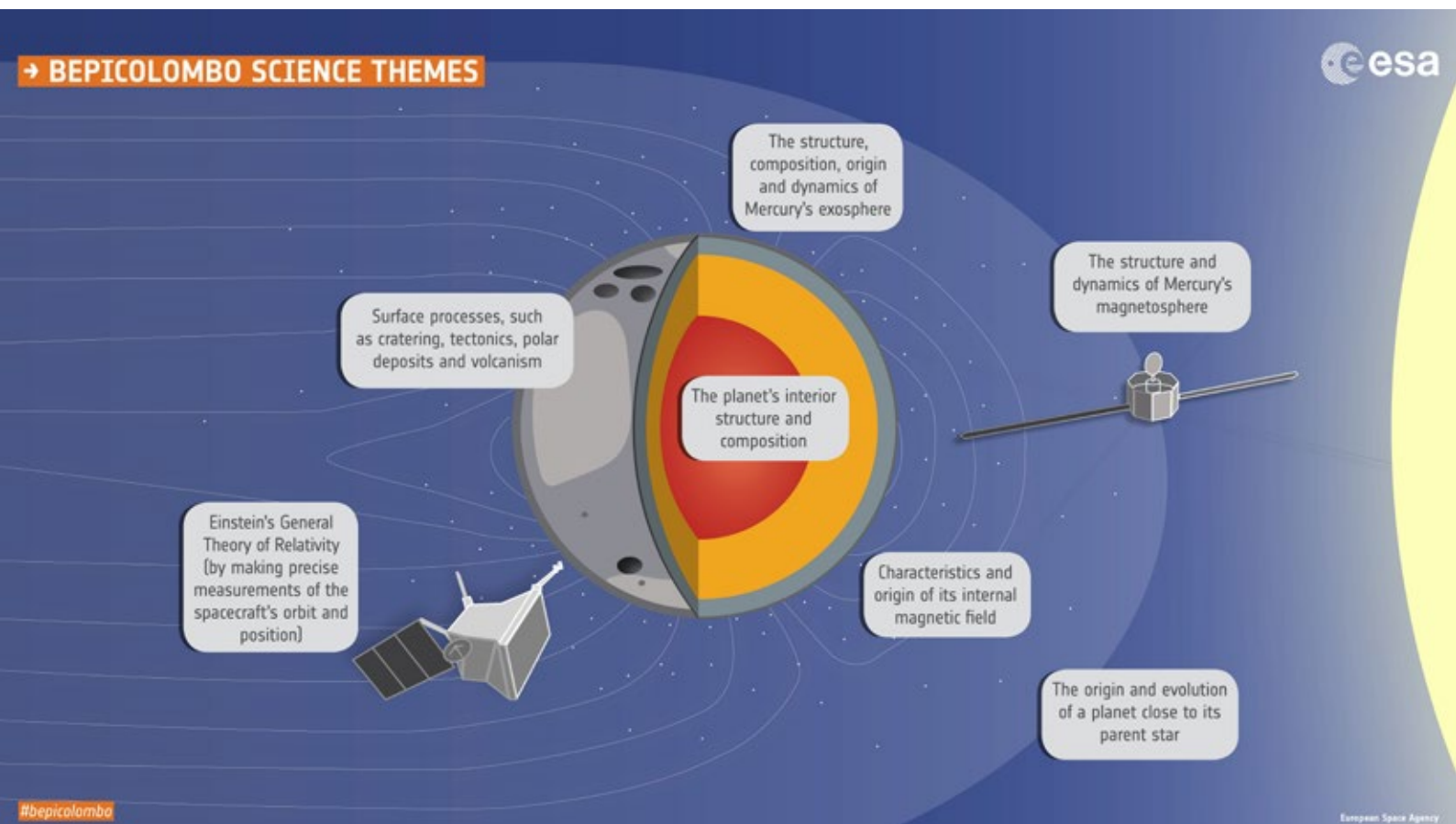
La mission **BepiColombo**, véritable cathédrale de l'exploration spatiale

BepiColombo, ainsi nommée en l'honneur du scientifique italien Giuseppe (Bepi) Colombo (1920-1984), est une mission composée non pas d'une, mais de deux sondes spatiales, qui seront déployées en même temps autour de Mercure. Afin d'arriver à Mercure à une vitesse suffisamment faible pour une mise en orbite, *BepiColombo* fera en tout dix-huit fois le tour du Soleil, en profitant de l'assistance gravitationnelle de la Terre, de Vénus et de Mercure pour changer progressivement d'orbite, sans avoir besoin de trop de carburant, selon l'idée de « Bepi » Colombo dans les années 1970. Pour effectuer ce long voyage, l'Agence spatiale européenne a conçu un module spécial muni de grands panneaux solaires et de quatre systèmes de propulsion ionique. À la fin de cette longue phase de croisière, le module de transfert libère les deux sondes scientifiques en orbite 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. L'une des sondes, le Mercury Planetary Orbiter (MPO), est conçue par l'Esa, qui est également chargée du module de transfert (MTM) – 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, le Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO), fabriquée, quant à elle, par le Japon.

Fig.3. Les objectifs des deux sondes de BepiColombo sont très complets : de l'intérieur de la planète à la magnétosphère, toutes les communautés scientifiques vont avoir des données exceptionnelles et inédites à exploiter, crédits : Esa.

BepiColombo est donc mieux à même que *Messenger* d'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 : du fait de nos méthodes actuelles de détection, les milliers d'exoplanètes découvertes sont souvent très proches de leur étoile, et l'exemple de Mercure nous permettra de mieux comprendre l'effet d'une telle proximité sur la planète.
- La deuxième, c'est comprendre Mercure en tant que planète de type terrestre : surface, histoire géologique, composition interne.
- En troisième lieu, les instruments de BepiColombo doivent permettre de mieux caractériser l'exosphère de Mercure : quels gaz ? En quelle quantité ? Quelle évolution dans le temps et l'espace, notamment au cours des hivers ? Le spectromètre français Phebus, conçu sous la responsabilité scientifique et technique du Laboratoire atmosphères, milieux, observations spatiales (Latmos), dédié à cette recherche, se trouve sur l'Orbiteur planétaire (MPO).
- La quatrième grande question porte sur la magnétosphère de Mercure (voir illustration) et son interaction avec le vent solaire, le gaz si particulier qui s'échappe du Soleil en permanence, à plus d'un million de kilomètres par heure, propageant avec lui le champ magnétique du Soleil jusqu'aux confins du Système solaire. Mercure est la seule planète du Système solaire possédant une magnétosphère dont la taille caractéristique est du



même ordre de grandeur que la taille de la planète. Parce qu'elle est si petite et si proche du Soleil, son interaction avec le vent solaire doit être étudiée en détail pour approfondir notre connaissance de la physique des magnétosphères. En effet, la Terre possède une magnétosphère qui nous protège, nous, nos satellites artificiels et toutes nos installations électriques, des tempêtes de vent solaire. Tandis que ni Mars ni Vénus n'ont un champ magnétique intrinsèque suffisant pour entretenir une magnétosphère de type terrestre. Les phénomènes détectés autour de Mercure nous permettront donc peut-être d'en apprendre davantage sur notre propre magnétosphère. Les deux sondes de BepiColombo emportent avec elles des instruments qui donneront des mesures inédites en matière de physique des plasmas, notamment Sorbet, un instrument fabriqué à l'Observatoire de Paris, au Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (Lésia), qui détectera la densité et la température des électrons autour de Mercure grâce à une méthode développée dans ce laboratoire et désormais utilisée dans le cadre de nombreuses missions spatiales, telle la récente Parker Solar Probe, envoyée en 2018 explorer le Soleil. Sorbet fait partie de l'Instrument des ondes des plasmas (PWI), embarqué sur la sonde japonaise. Un autre exemple, les analyseurs d'électrons « MEA », qui font partie de l'Expérience des particules de plasmas de Mercure (MPPE), ont été fabriqués à Toulouse, à l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie (Irap), et se trouvent eux-aussi sur MMO. En tout, ce sont huit laboratoires français qui ont apporté une contribution instrumentale à la mission.

- La cinquième question concerne l'origine du champ magnétique de Mercure, qui reste un grand mystère. Les deux sondes possèdent chacune un magnétomètre et des campagnes d'observations coordonnées entre elles deux sont prévues afin de dresser la carte la plus détaillée possible du champ magnétique de la planète.
- Enfin, sixième point, on va pouvoir vérifier si l'orbite de Mercure autour du Soleil « colle » avec les calculs de la relativité générale d'Einstein : en effet, Mercure est si proche du Soleil que l'on ne peut comprendre sa trajectoire autour du Soleil si l'on ne prend en compte la théorie de la relativité générale. Celle-ci n'ayant à ce jour jamais été mise en défaut, les scientifiques sont toujours curieux de voir si elle fonctionne encore quand on augmente la précision des mesures.



*Fig.4. En avril 2020, BepiColombo a pris cette image très émouvante de la Terre, lors de sa dernière occasion de lui dire au revoir.
Crédits : Léa Griton/Lésia.*

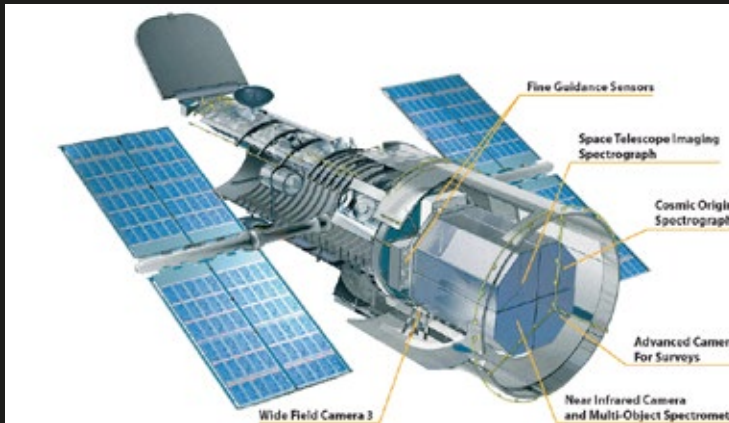
L'essentiel des instruments de *BepiColombo* ne sera mis en marche qu'après la mise en orbite autour de Mercure, en décembre 2025. Michel Moncuquet, PI (*Principal Investigator*, autrement dit responsable scientifique) de l'instrument Sorbet, aime décrire *BepiColombo* comme une « cathédrale » : la mission a été planifiée il y a plus de trente ans, et certains scientifiques du début sont ou seront partis à la retraite bien avant de voir les données arriver sur Terre. Il faut donc que la nouvelle génération prenne le relais, connaisse les instruments et les objectifs scientifiques pour pouvoir assurer l'exploitation desdites données à partir de 2025 (et durant plusieurs décennies après la fin prévue de la mission, en 2027 ou 2028).

Les responsables scientifiques des agences spatiales impliquées veillent donc particulièrement à intégrer les doctorants et les jeunes chercheurs dans les colloques scientifiques de *BepiColombo*. Cet aspect intergénérationnel et la dimension très internationale du projet (seize pays européens impliqués, en plus du Japon) font que celui-ci mobilise une grande famille scientifique très soudée, qui s'apprête à célébrer comme il se doit le troisième anniversaire de *BepiColombo* dans l'espace.

Bonne route, *BepiColombo* !

LES IMAGES PRISES DEPUIS L'ESPACE

Les télescopes spatiaux peuvent observer dans le visible mais également dans des longueurs d'onde difficiles ou impossibles à capter depuis le sol. Voici trois télescopes spatiaux connus et pour chacun d'eux, une de leurs images.



Ligne 1 : le télescope spatial **Hubble** est le plus célèbre des télescopes spatiaux. Lancé il y a déjà 31 ans, il continue à fournir de superbes images dans le visible mais également dans le proche infrarouge et l'ultraviolet (crédits : centre de vol spatial Goddard NASA). La nébuleuse de l'œil de chat photographiée par le HST (crédits NASA, ESA, HEIC, and The Hubble Heritage Team STScI/AURA).

Ligne 2 : le télescope **Herschel** était spécialisé dans l'infrarouge et le submillimétrique. Avec un miroir de 3,5 m de diamètre, il a fonctionné de 2009 à 2013, ayant dû s'arrêter faute d'hélium pour refroidir ses instruments (crédits ESA). Une région de formation d'étoiles dans le Cygne. L'image combine des images obtenues à 70 microns (canal bleu), 160 microns (canal vert) et 250 microns (canal rouge). Il s'agit donc de fausses couleurs (crédit ESA/PACS/SPIRE/Martin Hennemann & Frederique Motte, Laboratoire AIM Paris-Saclay, CEA/Irfu - CNRS/INSU - Univ. Paris Diderot, France).

Ligne 3 : **XMM** est un instrument de l'ESA observant dans les rayons X. Lancé en 1999, il pourrait fonctionner jusqu'en 2025 (crédit NASA). Cette image de M82 montre une région de formation d'étoiles et des panaches de vents supergalactiques, là aussi en fausses couleurs (crédit ESA).

IMAGES DE L'UNIVERS EN RAYONS X

Anne Decourchelle, service d'astrophysique, CEA Saclay.

Les rayons X issus du cosmos sont difficiles à étudier car ils sont composés de photons très énergétiques qui sont absorbés par toute forme de matière, en particulier par l'atmosphère terrestre qui nous protège. Les sources de rayons X sont proches des noyaux galactiques. Leur étude permet de déterminer les paramètres qui régissent l'explosion des supernovae.

L'astronomie X est l'étude observationnelle du ciel en rayons X. Elle a une histoire beaucoup plus récente que l'astronomie optique ou la radioastronomie. Ses débuts ont été intimement liés au développement du domaine spatial dans les années 1960.

Dépasser l'atmosphère terrestre

L'atmosphère terrestre, en absorbant les radiations énergétiques du cosmos, nous protège de leurs effets nocifs. La figure 1 montre l'altitude jusqu'à laquelle pénètre le rayonnement

électromagnétique du cosmos en fonction de sa longueur d'onde. Selon le domaine électromagnétique et le besoin requis de précision des mesures, les observations astronomiques sont ainsi menées à partir de sites terrestres (souvent à haute altitude et avec de l'optique

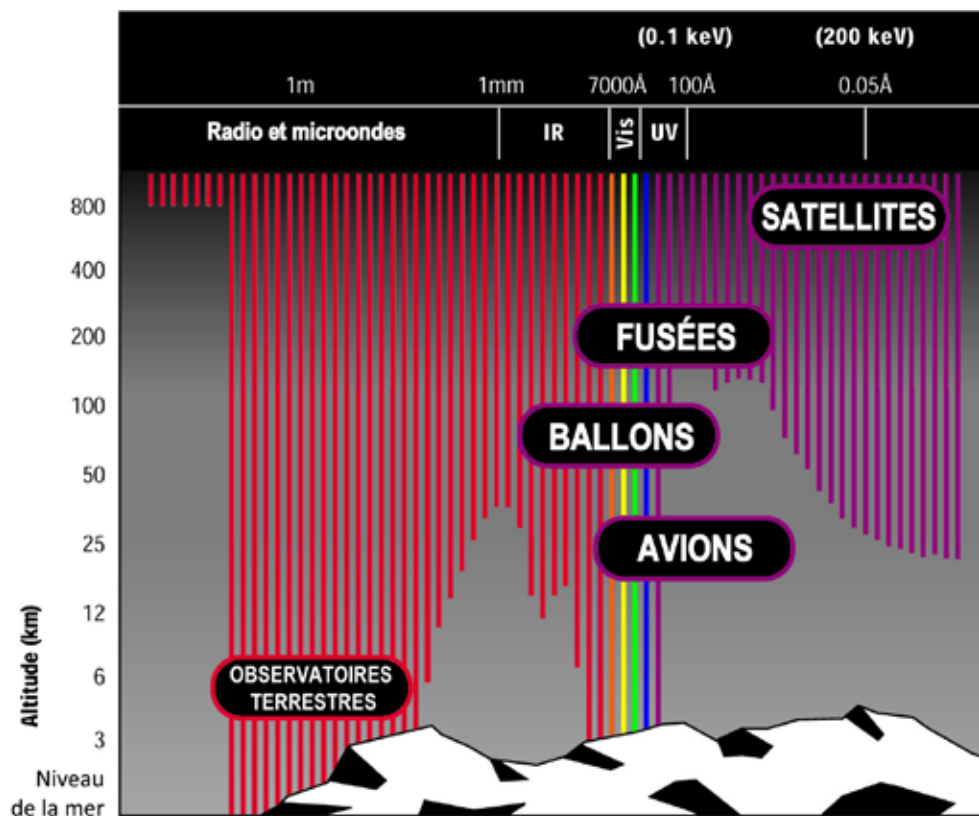


Fig.1. Altitude de pénétration de la lumière dans l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde. Crédit : adapté de la NASA.

adaptative), atmosphériques (ballons, avions), ou au-delà (fusées, satellites). L'absorption est totale pour les photons UV, X et gamma. Les photons X cosmiques sont en effet absorbés par les atomes d'oxygène et d'azote de la haute atmosphère rendant l'accès à l'espace indispensable pour observer l'Univers en rayons X.

L'ouverture d'une nouvelle fenêtre sur l'Univers

Les premières observations en rayons X furent obtenues à partir d'instruments embarqués sur des vols en fusée par le Naval Research Laboratory (États-Unis) et aboutirent à la découverte en 1946 de l'émission en rayons X (et UV) du Soleil. De

nombreux autres vols suivirent dans les années 1950 pour étudier les propriétés du Soleil. Mais le Soleil est brillant en rayons X car il est proche de nous. En le plaçant à la distance de l'étoile la plus proche, il manquait aux instruments X de l'époque un facteur 100 000 en sensibilité pour être détectable ! Cela laissait peu d'espoir de détecter des sources X au-delà du Soleil.

Un défi instrumental qui a été relevé par une équipe américaine de l'AS&E (American Science and Engineering) menée par Riccardo Giacconi. Dans un contexte où les États-Unis s'étaient donnés pour ambition de marcher sur la Lune, l'objectif scientifique principal pour développer de nouveaux instruments X devint de détecter l'émission de la surface lunaire. Une émission X devait être produite par l'interaction des particules du vent solaire avec la surface lunaire et par la fluorescence X des matériaux de la surface lunaire induite par l'émission X du Soleil. Une partie très exploratoire du programme d'observation prévoyait également le balayage d'une portion du ciel pour rechercher d'éventuelles sources extrasolaires d'émission X. Après une défaillance instrumentale lors d'un premier vol en fusée en 1961, ce fut le succès lors du second vol (de 350 secondes) en juin 1962. L'émission de la Lune ne fut pas détectée, mais une source extrêmement puissante de rayons X extrasolaires fut découverte. Située dans la constellation du Scorpion, cette première source X extrasolaire (nommée Sco X-1) révéla que des processus extrêmement énergétiques étaient à l'œuvre dans l'Univers. Mais lesquels ? Une nouvelle fenêtre d'observation de l'Univers, celle de l'astronomie des rayons X, s'ouvrait et captivait la communauté avec ses nouveaux enjeux scientifiques. Quarante ans plus tard, le prix Nobel de physique 2002 a été attribué à Riccardo Giacconi pour cet accomplissement, qui a marqué le début de l'exploration en rayons X de l'Univers et de ses conditions extrêmes. Une révolution que nous vivons actuellement avec la découverte des premières sources d'ondes gravitationnelles.

Jusqu'en 1970, ce sont des instruments à bord de fusées et ballons qui explorèrent le ciel X et détectèrent plusieurs autres sources

cosmiques (comme le reste de supernova du Crabe). Mais il fallut attendre le premier satellite en rayons X, Uhuru, lancé le 12 décembre 1970, pour obtenir un balayage complet du ciel et découvrir plus de 300 sources d'émission X. Quelles étaient la nature de ces sources inconnues, leurs mécanismes d'émission et leurs sources d'énergie ?

Répondre à ces questions nécessitait de connaître la localisation précise des sources X observées, afin de rechercher leurs contreparties dans les autres longueurs d'onde, de réaliser des images en rayons X de ces sources, d'obtenir leurs spectres X et les courbes de lumière X des sources dont l'intensité varie dans le temps, et enfin de collecter un grand nombre de sources X pour identifier les différentes populations et leurs propriétés. Cela a été et reste les objectifs phares des instruments et télescopes X et se décline en matière de performance en sensibilité, résolution spatiale, spectrale et temporelle.

Comment imager les rayons X de l'Univers

Détection par incidence rasante

Le premier frein pour réaliser des images X du cosmos est que les photons X, contrairement aux photons visibles, ne se réfléchissent pas à incidence normale dans un miroir. Du fait de leur énergie très supérieure, ils pénètrent, diffusent et sont rapidement absorbés. C'est uniquement à incidence rasante qu'il est possible de les réfléchir sur une surface de type métallique extrêmement lisse. Une analogie serait le ricochet de galet à la surface de l'eau : lancé avec un très petit angle par rapport à la surface de l'eau, le galet peut rebondir plutôt que de couler. Le physicien allemand Hans Wolter proposa dans les années 1950 trois concepts

de télescope X (dits télescopes de Wolter). Utilisant deux réflexions à incidence rasante successives sur des surfaces réfléchissantes parabolique et hyperbolique (cf. figure 2), ils permettent de focaliser les rayons X et de former une image. Ce principe d'imagerie X a été développé dès les années 1970. Il a permis d'obtenir les premières images en rayons X à partir de l'observatoire américain Einstein, lancé en 1978, puis de ses successeurs, jusqu'aux observatoires actuels Chandra (US) et XMM-Newton (ESA) lancés en 1999, et eROSITA (allemand) en 2019. Afin de collecter plus de photons, plusieurs couches de miroirs concentriques sont emboîtées. C'est l'observatoire XMM-Newton qui dispose actuellement de la plus grande surface collectrice de photons X avec un système d'optique focalisante. Chacun de ses trois télescopes est constitué de 58 miroirs très fins en nickel et plaqués or. De longueur 60 cm (pour des rayons de 25 à 35 cm), les 58 miroirs sont emboîtés à une précision de quelques millimètres dans une configuration coaxiale (cf. figure 2). La longueur focale du télescope est de 7,5 m. Si la surface globale des miroirs des trois télescopes dépasse les 120 m², la surface géométrique effective de collecte des photons X est bien plus réduite (de l'ordre de 0,15 m²/télescope et dépend de l'énergie du photon).

L'enjeu actuel est la conception de la plus grande mission en rayons X, Athena (ESA), dont le lancement est prévu vers 2034. L'observatoire spatial Athena sera doté d'une nouvelle technologie optique (Silicon Pore Optics), reposant sur l'empilement de deux blocs (parabolique et hyperbolique) de plaquettes de silicium. La structure circulaire du télescope d'environ 2,5 m de diamètre sera constituée de près de 600 modules de miroirs assemblés sur une quinzaine de rangées circulaires, et savamment

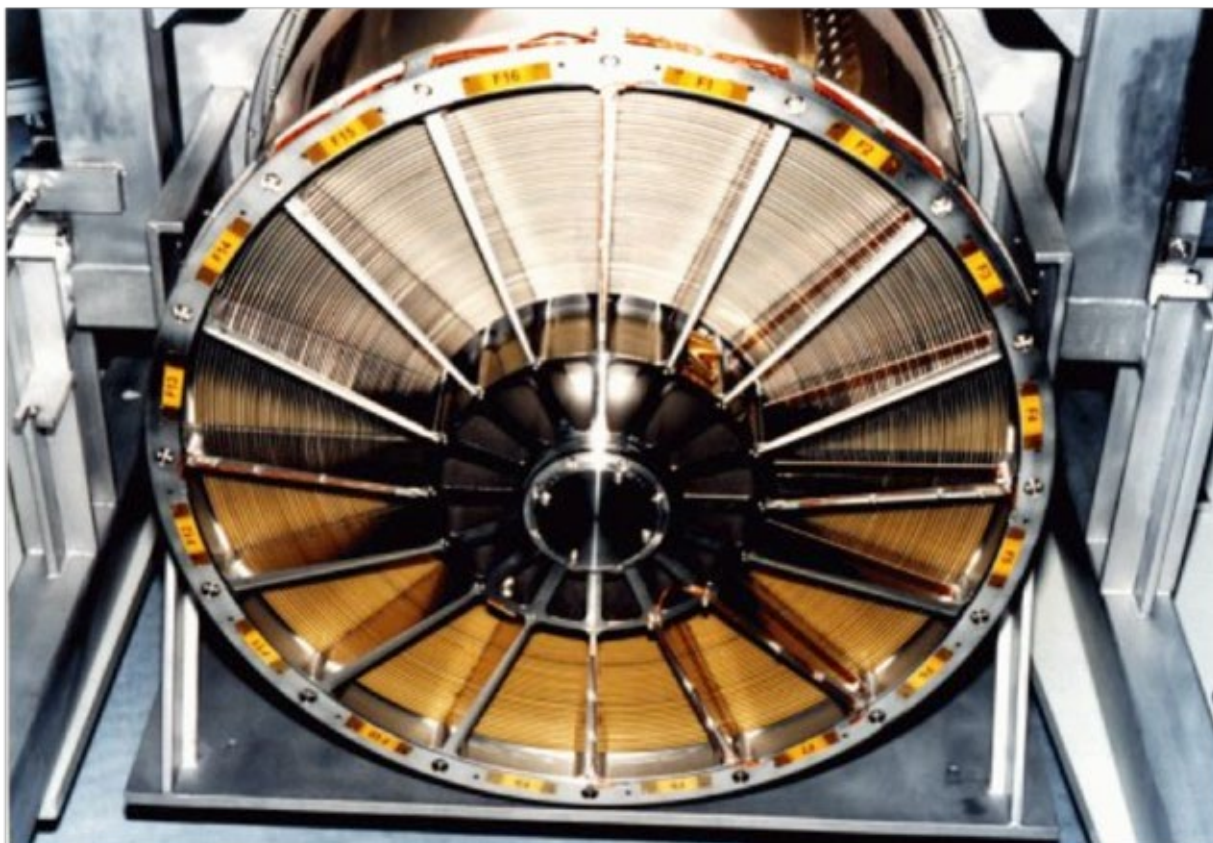
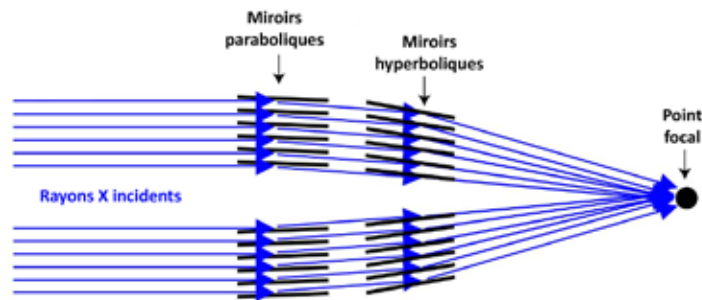


Fig.2. En haut, un schéma en coupe du principe d'un télescope X à incidence rasante de type Wolter I, constitué pour cette illustration de 6 ensembles de miroirs emboîtés (Crédit : adapté de la NASA).
En bas, photo d'un des trois télescopes de XMM-Newton montrant les 58 miroirs cylindriques emboîtés (Crédit : ESA).

optimisés pour atteindre les meilleures performances. Il s'agira de la plus grande optique en rayons X jamais réalisée.

Quelles sont les sources de rayons X ?

Les rayons X tracent les composantes énergétiques de l'Univers. Ils sont produits dans des conditions extrêmes : température très élevée (de l'ordre du million à la centaine de millions de degrés), très fort champ de gravité, intense champ magnétique, ou présence de particules relativistes de très haute énergie.

Alors que le premier satellite en rayons X Uhuru avait détecté

339 sources en rayons X, ce sont actuellement plus de 500 000 sources d'émission X qui ont été répertoriées par l'observatoire XMM-Newton.

Parmi ces sources, on observe une fraction importante, proche de la moitié, de noyaux actifs de galaxies, au cœur desquels se trouve un trou noir supermassif qui engloutit la matière qui l'environne. Dans les galaxies, les sources en rayons X dominantes sont les systèmes binaires d'étoiles dont l'une est un objet compact (trou noir, étoile à neutrons) qui avale la matière de son étoile compagnon. La première source X découverte Sco X-1 en est un exemple. Les observations en rayons

X permettent aussi d'observer des pouponnières d'étoiles en formation, des étoiles massives ou avec une activité magnétique soutenue, ainsi que la fin de vie des étoiles, sous la forme de restes de supernovae, de pulsars, de nébuleuses de vent de pulsar, de rémanents de sursauts en rayons gamma, ou de magnétars. C'est également en rayons X que l'on peut observer et caractériser les propriétés du milieu interstellaire chauffé à des millions de degrés dans les galaxies par notamment les étoiles massives et les supernovae, ainsi que celles du gaz chaud intergalactique dans les amas de galaxies. En revenant plus près de la

Terre et du Système solaire, on peut observer le faible rayonnement X des planètes, comme Mars, Jupiter, Saturne, et des comètes. Il est dû à la réflexion des rayons X solaires sur leur atmosphère ou surface, ainsi qu'à l'interaction avec les particules du vent solaire.

L'astronomie des rayons X s'intéresse ainsi à l'ensemble des structures de l'Univers et apporte un éclairage unique sur ses composantes chaudes et énergétiques. Pour illustrer la richesse des images en rayons X, regardons deux exemples, le reste de la supernova de Tycho et la région centrale de notre Galaxie. Ils mettent en exergue de façon complémentaire la variété et la richesse des informations récoltées.

Les restes de supernova

Les étoiles les plus massives (plus de 10 fois la masse du Soleil) finissent leur vie lors d'une spectaculaire explosion en supernova générée par leur effondrement gravitationnel. Tandis que le cœur de l'étoile se transforme en objet compact (étoile à neutrons, trou noir) sous l'effet de la gravité, l'enveloppe de l'étoile est expulsée lors de l'explosion. Le reste de supernova est alors constitué de l'objet compact et de la matière éjectée, les *ejecta*. Ils sont composés d'éléments lourds synthétisés en fin de vie de l'étoile et lors de l'explosion. Une naine blanche en système binaire explose, quant à elle, par combustion thermonucléaire en avalant plus qu'il n'en faut la masse de son étoile compagnon. Son explosion ne laisse comme résidu que la matière éjectée.

En 1572, «une nouvelle étoile» apparaît dans le ciel. Elle est découverte par l'astronome danois Tycho Brahé qui l'observe à l'œil nu pendant presque deux ans jusqu'à ce qu'elle disparaisse. Ce n'est que dans les années 1950, sur la base des observations de Tycho Brahé, que le phénomène a été attribué à une supernova et plus précisément à l'explosion thermonucléaire d'une naine blanche.

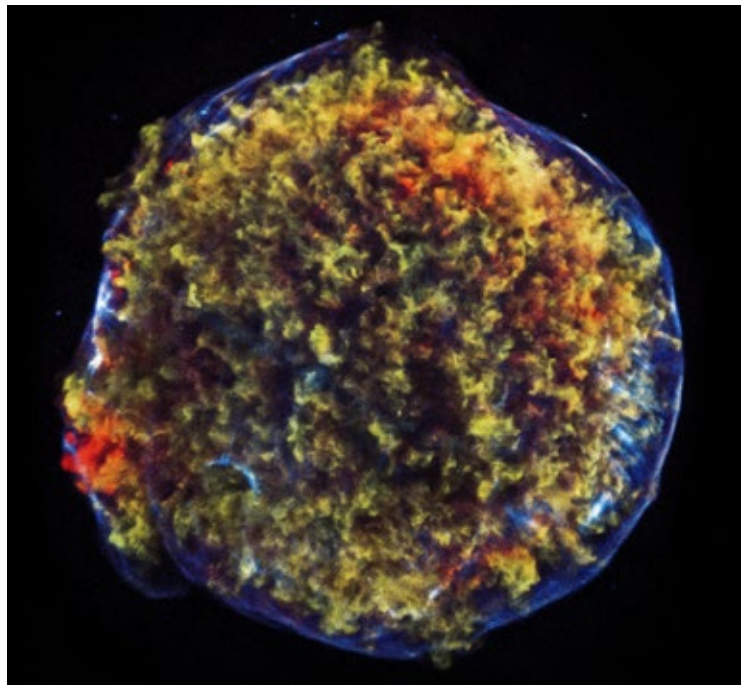


Fig.3. Image composite en rayons X du reste de la supernova de Tycho observée par le satellite Chandra. Les couleurs représentent différentes bandes d'énergie. En rouge (0,95-1,26 keV), l'émission est dominée par les raies d'émission du fer ; en vert (1,63-2,26 keV) par celles du silicium et en bleu par le continu à haute énergie (4,1-6,1 keV). La taille apparente du reste est de 8 minutes d'arc. Crédit : NASA/CXC/SAO.

La figure 3 montre l'image du reste de la supernova de Tycho (SN1572) observé en rayons X plus de 400 ans après son explosion. Il est localisé dans notre Galaxie à une distance de plusieurs milliers d'années-lumière. Le reste de supernova est créé par l'interaction de la matière éjectée à des vitesses de dizaines de milliers de km/s avec le milieu environnant. Les chocs générés chauffent la matière (ejecta et milieu environnant) à des dizaines de millions de degrés, qui émet alors en rayons X. Selon la nature de l'étoile et le mécanisme d'explosion, l'empreinte laissée sur le reste de supernova est différente.

Scruter la matière synthétisée par la supernova

Ce sont en premier lieu les ejecta (en jaune/rouge/vert) que l'on observe dans l'image en rayons X du reste de supernova de Tycho (figure 3). L'émission X révèle la morphologie grumeleuse et inhomogène de la matière éjectée. Sa structuration en nombreux petits globules de matière est le résultat d'instabilités à l'interface entre les ejecta et le milieu environnant. La figure 3 est une image composite en rayons X : une couleur différente est attribuée selon

la bande d'énergie¹. En rouge (0,95-1,26 keV), l'émission est dominée par les raies d'émission du fer ; en vert (1,63-2,26 keV) par celles du silicium et en bleu par le continu à haute énergie (4,1-6,1 keV). Les différentes couleurs des ejecta reflètent ainsi les variations de composition des globules d'ejecta imputables aux détails de l'explosion. Par exemple, le globule rouge visible à la périphérie du reste est dominé par le fer et se trouve entouré de globules de silicium (vert/jaune). Pour quantifier la composition de ces produits de nucléosynthèse éjectés, et connaître les conditions qui règnent dans le plasma, il est nécessaire de modéliser les spectres en rayons X par des modèles physiques. La morphologie, la composition, ainsi que les conditions physiques des ejecta, sont essentielles pour

¹ En rayons X, on détecte les photons un par un, avec leur position sur le ciel, leur énergie et leur temps d'arrivée. L'information sur l'énergie des photons est cruciale pour distinguer les différents processus d'émission en jeu, la nature et les propriétés du plasma observé (température, composition, densité...). Dans la gamme d'énergie 0,1-10 keV, on a ainsi accès à l'émission du plasma chauffé sous la forme d'un continu et de raies d'émission des éléments (très ionisés) tels que l'oxygène, le silicium, le soufre ou le fer, mais également à l'émission synchrotron des électrons accélérés au choc à des vitesses relativistes.

déterminer le type de supernova, les paramètres de l'explosion et ses mécanismes physiques.

Accélération de particules dans les restes de supernova

Les restes de supernova sont considérées comme l'une des principales sources à l'origine du rayonnement cosmique (électrons et noyaux relativistes) qui baigne notre Galaxie. L'image composite en rayons X du reste de la supernova de

Tycho (figure 3) révèle la présence d'un fin filament (en bleu), encerclant le reste de supernova. Ce filament provient de l'émission d'électrons accélérés à très haute énergie (TeV). Il trace le choc principal qui, se propageant à grande vitesse (quelques milliers de km/s), accélère des particules à des vitesses proches de la lumière. Si le rayonnement des électrons relativistes de haute énergie est observée dans le domaine des rayons X, c'est en rayons gamma de

très haute énergie que l'on observe le rayonnement des noyaux accélérés (hydrogène, hélium,...).

Vers le centre de notre Galaxie

La figure 4 présente une image composite en rayons X de la région centrale de notre Galaxie. Ces observations révèlent une grande richesse de sources astrophysiques et de processus énergétiques à l'œuvre dans la région centrale de notre

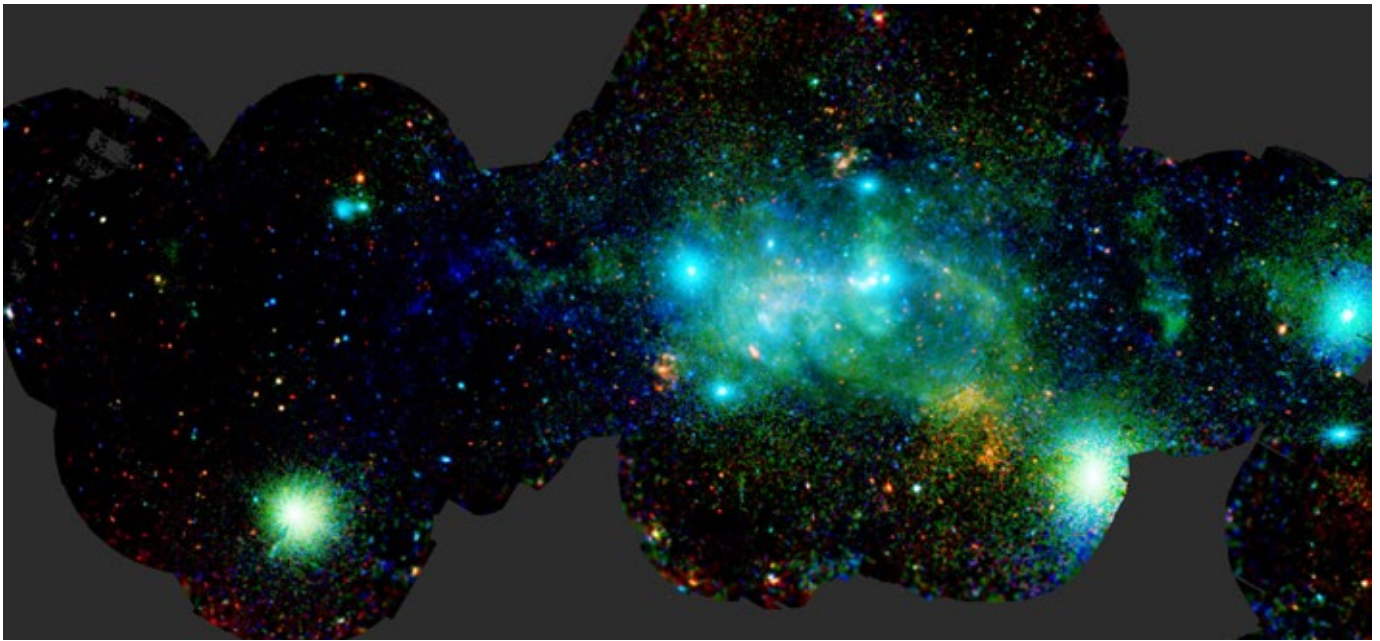


Fig.4. Image composite en rayons X de la région centrale de notre Galaxie obtenue à partir d'une mosaïque d'observations par le satellite XMM-Newton. En rouge sont représentés les photons d'énergie dans la bande 0,5-2 keV, en vert ceux de 2 à 4,5 keV et en bleu ceux de 4,5 à 12 keV. L'image s'étend sur 2,5 degrés. Crédit : ESA/XMM-Newton/G. Ponti et al. 2015. Crédit : NASA/JPL-Caltech.

Galaxie. Les sources ponctuelles (points rouges, verts et bleus) sont essentiellement des systèmes binaires où l'objet compact (naine blanche, étoile à neutrons ou trou noir) avale la matière de son étoile compagnon. Cette matière est chauffée en tombant sur l'objet compact et émet fortement en rayons X. On observe également des amas d'étoiles. Les structures diffuses structurées (bulles, coquilles) sont des restes de supernova, et des superbulles créées par l'action combinée de vents stellaires dans des amas de jeunes étoiles et de supernovae. L'ensemble de la région centrale est rempli d'un plasma à des millions de degrés, qui s'élève sous forme de lobes de part et d'autre du disque de notre Galaxie.

On observe dans la partie la plus centrale une intense activité sous l'effet des vents d'étoiles jeunes et massives et des supernovae. Enfin, tout au cœur de notre Galaxie, dans la région la plus brillante, se trouve Sgr A*, le trou noir supermassif de plusieurs millions de masses solaires. Il avale sporadiquement de la matière environnante qui, échauffée en tombant sur le trou noir, émet en rayons X. On suspecte que Sgr A* a été beaucoup plus actif par le passé.

Préparer le futur

Scruter l'Univers en rayons X ouvre une fenêtre unique sur l'Univers chaud et énergétique, complémentaire des autres longueurs d'onde et des ondes gravitationnelles.

C'est l'objectif de la grande mission spatiale Athena en préparation par l'Agence spatiale européenne pour un lancement dans les années 2030. Elle emportera deux instruments, dont le X-IFU, un spectro-imageur innovant sous responsabilité française et maîtrise d'œuvre du CNES qui fournira des images et des spectres avec une sensibilité et une résolution inégalées. En route pour de nouvelles découvertes !

IMAGERIE SPATIALE DANS L'INFRA-ROUGE ET LE SUBMILLIMÉTRIQUE

Marc Sauvage, astrophysicien au CEA

L'auteur définit ce qu'est l'infrarouge pour les images d'astronomie et les conditions pour les obtenir, avant de détailler les différentes étapes permettant d'obtenir une image présentable au grand public. Derrière ces images en fausses couleurs se cache un long travail entre la collecte du signal et la réalisation de l'image.

Tout d'abord, puisqu'il s'agit d'exposer les particularités de l'imagerie dans ce domaine spectral, définissons-le : pour les astronomes l'infrarouge (IR) s'ouvre aux alentours de quelques microns et se referme vers quelques centaines de microns, région de transition où l'on arrive dans le submillimétrique (submm), qui logiquement s'arrête aux longueurs d'onde de l'ordre du millimètre, pour laisser la place au domaine radio. Ces limites viennent des technologies déployées pour convertir les photons en signaux électriques, étape que l'on appellera ici la « détection ». De nos jours, les techniques de détection jusqu'à environ 30-50 μm sont très proches de celles déployées dans le domaine optique et pour cette raison, nous nous limiterons à discuter d'imagerie spatiale dans le domaine allant d'environ 50 μm à 1 mm.

Ceci posé, passons au deuxième terme important du titre : imagerie. C'est le fait d'obtenir des images avec un appareil technique. Mais qu'est-ce qu'une image ? Pour la plupart d'entre nous l'image est notre principal mode d'interaction avec le monde : nos yeux forment deux images de notre environnement, notre cerveau y reconnaît des objets et structures, et exploite les différences entre les deux images pour localiser ces objets et structures et nous permettre d'évoluer dans le monde. Une image c'est donc bien plus qu'une distribution de couleurs et d'intensités, c'est une représentation bidimensionnelle d'informations, et puisqu'on parle d'information et de représentation, la réalisation d'images en astronomie est un processus qui implique 4 étapes : la focalisation des photons sur un détecteur, la détection pour transformer les photons en signal, le traitement de ce signal et enfin la reconstruction d'une image. Nous allons parcourir ces 4 étapes en discutant des particularismes imposés par le domaine spectral, mais avant cela intéressons-nous à une question fondamentale.

Pourquoi l'espace et pourquoi l'infrarouge et le submillimétrique ?

Bien que nous vivions depuis quelques années dans une époque où l'accès à l'espace semble aisé, au point qu'on ne se soucie plus de préserver ce bien commun qu'est le

ciel nocturne, on ne décide pas de réaliser une expérience spatiale par caprice. Les coûts, la complexité et les limites (en taille, en masse, en puissance) imposés par le spatial sont tels que ce choix n'est fait que lorsqu'il est impossible d'atteindre les mêmes objectifs scientifiques à partir du sol ou de la haute atmosphère (avec un ballon).

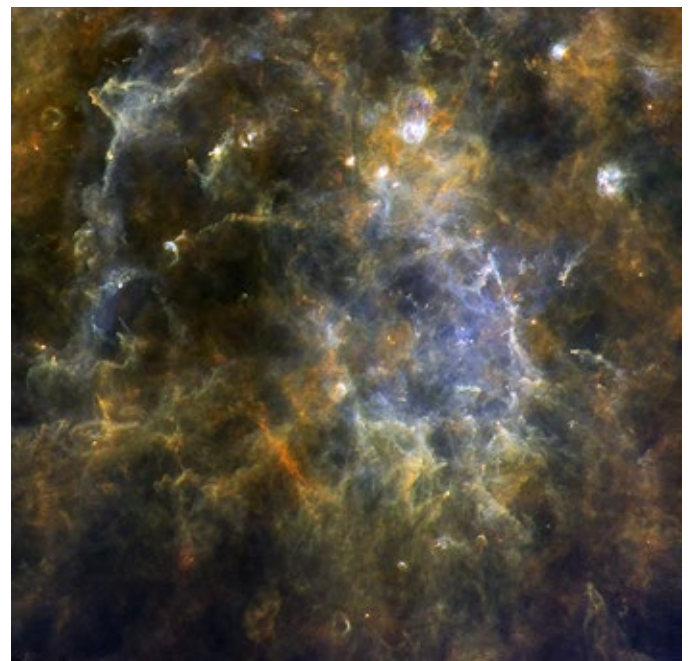


Fig.1a. Une carte Herschel d'une région de formation d'étoiles dans la constellation de la Carène. Il s'agit d'une carte en fausses couleurs où sont combinées trois images, à 70 μm pour le canal bleu, 160 μm pour le canal vert, et 250 μm pour le canal rouge. Avec ce codage, les régions les plus chaudes, celles qui contiennent des étoiles déjà formées, apparaissent en bleu, alors que les filaments qui contiennent les étoiles à naître apparaissent en rouge. Le champ de l'image est nettement plus grand que celui des détecteurs d'Herschel et cette carte est le produit de plusieurs heures d'observation par balayage.
crédits : ESA/Herschel/PACS, SPIRE/Hi-GAL Project).

Ici c'est le cas : l'atmosphère est à la fois opaque, très brillante et instable. L'opacité s'explique principalement par la présence d'eau et le fait que les longueurs d'onde IR et submm correspondent à des transitions de vibration et rotation de ces molécules. La brillance de l'atmosphère vient de ce qu'il s'agit d'un corps dont la température place l'émission de refroidissement pile dans le domaine qui nous intéresse, et l'instabilité est le résultat des vents

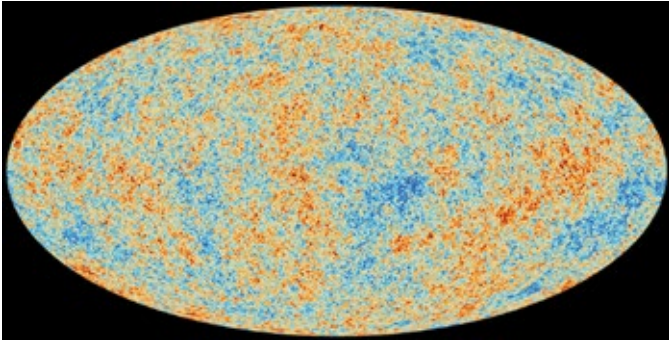


Fig 1b. La carte des fluctuations de la température du rayonnement cosmologique fossile autour de sa température moyenne (2,725 K) obtenue en analysant toutes les données de la mission Planck. Le satellite réalisait une carte complète du ciel en six mois dans 9 bandes spectrales distinctes. Ces observations multispectrales ont permis de séparer le rayonnement fossile des autres émissions et de mesurer sa température en tout point du ciel, sauf dans le plan galactique, trop brillant. Une extrapolation statistiquement conforme remplit les zones occupées par le plan galactique (la région médiane de l'image). (Crédits ESA/Planck Collaboration).

violents qui agitent notre atmosphère...

À de très rares exceptions près, l'observation depuis l'espace s'impose donc.

Quels sont alors les objectifs scientifiques principaux de l'observation astronomique dans ce domaine spectral ? On peut en distinguer deux principales catégories, illustrées par les figures 1a et 1b.

La première est liée à la nature du rayonnement qui domine l'émission, à savoir un rayonnement thermique de refroidissement émis par des poussières (des solides micro- et nanométriques). Ces poussières ont des origines diverses (enveloppes d'étoiles en fin d'évolution, éjecta de supernovæ, condensation dans les nuages interstellaires), et leur présence dans le milieu interstellaire permet d'y étudier des processus inaccessibles autrement. En effet, compte tenu de la densité d'énergie présente dans une galaxie (produite essentiellement par les étoiles), la température de cette poussière va d'une dizaine de kelvins (K) à plusieurs centaines de K, ce qui place son rayonnement de refroidissement principalement dans l'IR et le submm.

Le principal phénomène étudié est la formation des étoiles, qui débute par des processus de densification des nuages interstellaires, mal compris avant la mission Herschel, et se poursuit par un effondrement gravitationnel des régions les plus denses. Les observations du satellite Herschel ont mis en évidence une étape clé de ce processus, en révélant la présence systématique de réseaux de filaments de matière interstellaire dans les nuages, résultat combiné de la turbulence dans ces milieux diffus et du champ magnétique. Ce sont ces filaments qui abritent ensuite les cœurs d'étoiles en formation, et c'est en modélisant l'émission collectée (voir la section *reconstruction*) que l'on a pu remonter aux propriétés physiques des filaments et préciser leur origine.

La deuxième catégorie d'objectifs est liée à l'étude du rayonnement cosmologique fossile, cette lumière émise

lorsque l'Univers est devenu transparent il y a de cela pratiquement 13 milliards d'années, et que l'expansion a décalé spectralement pour la rendre aujourd'hui observable dans le domaine submm et au-delà. Le rayonnement fossile est observable du sol mais les précisions requises de nos jours pour en extraire des contraintes sur l'histoire et la nature de l'Univers sont telles qu'il n'est souvent pas possible de tolérer les incertitudes introduites par l'atmosphère. Il faut aussi préciser que cette mesure est loin d'être directe car le rayonnement fossile, s'il est bien présent sur tout le domaine spectral, n'est que très rarement l'émission la plus intense. Il faut passer par une série d'étapes combinant modélisation et acquisition de données à d'autres longueurs d'onde (en radio par exemple pour mesurer le gaz dans notre galaxie), pour séparer l'émission cosmologique de toutes les autres composantes. Les cartes de ce fond cosmologique qui ont fait la une des journaux lors de la mission Planck ne sont donc pas le résultat d'une simple captation du rayonnement infrarouge.

Revenons maintenant au cœur du sujet, la réalisation d'images.

Focalisation

Tous les objets astronomiques peuvent très exactement être vus comme des sources à l'infini, et la première étape de formation d'une image va donc être de construire des systèmes capables de collecter la plus grande quantité d'énergie en provenance de ces objets et de focaliser cette énergie sur une surface sensible.

Dans ce numéro, on trouvera des situations (dans les domaines X ou gamma) où cette étape est extrêmement complexe du fait de l'impossibilité de faire se réfléchir les photons sur des surfaces. Ce n'est pas le cas ici et les montages optiques tels que les télescopes réflecteurs déployés dans le domaine visible sont tout à fait adaptés à l'IR et au submm. Le défi principal est de faire en sorte que le télescope n'aveugle pas de son rayonnement propre le détecteur. En effet le télescope produit un rayonnement thermique et, suivant sa température, ce rayonnement peut être plus intense que celui des sources astronomiques. C'est pour cela que les satellites « infrarouges » ont déployé des stratégies de refroidissement de leurs télescopes (figure 2). Pour des diamètres inférieurs au mètre (IRAS, ISO, Spitzer), le télescope a pu être placé dans un cryostat qui en garantissait le refroidissement vers des températures inférieures à la dizaine de K (le rendant effectivement « invisible »), mais lorsque le diamètre ou la géométrie du montage optique empêchait la réalisation d'un cryostat (Herschel, Planck), le télescope a dû être protégé du chauffage solaire par des écrans qui descendent passivement la température vers les 50-80 K. À ces températures les surfaces sont lumineuses mais pas au point d'aveugler les détecteurs.



Fig.2. De gauche à droite et de haut en bas, des vues d'artiste des satellites ISO, Spitzer, Herschel et Planck, illustrant les différentes stratégies de refroidissement du télescope. Dans le cas d'ISO, le télescope est à l'intérieur du cryostat qui contient aussi les instruments situés derrière le miroir primaire. Dans le cas de Spitzer, il lui est connecté thermiquement et l'ensemble est isolé dans un système de tubes qui optimisent l'évacuation de la chaleur. Comme pour ISO les instruments sont eux dans le cryostat. Dans le cas d'Herschel, le télescope est aussi posé au-dessus du cryostat mais il ne lui est pas connecté. Le cryostat sert uniquement aux instruments. Le refroidissement du télescope de 3,5 m est uniquement passif du fait de l'ombre portée de l'écran solaire. Enfin pour Planck où le télescope doit être plus froid que celui d'Herschel, un système d'écrans enchâssés, dit en V-grooves, est positionné entre le télescope et le module de service et fait aussi écran aux rayons du Soleil situé « sous » le satellite dans cette représentation.

Détection

Détecter un rayonnement, c'est utiliser une interaction physique entre lumière et matière pour convertir certaines des propriétés de ce rayonnement en signal, généralement électrique, susceptible d'être transféré du

lieu de détection vers un lieu d'analyse. Ces propriétés peuvent être la longueur d'onde, la phase et l'amplitude de l'onde, l'énergie du photon, son temps d'arrivée... Dans le visible et le proche IR on utilise des matériaux semi-conducteurs ajustés pour que l'énergie des photons

fasse passer des électrons de la bande de valence à la bande de conduction et on compte les charges produites. Dans l'IR et le submm l'énergie des photons est plus faible et il n'existe pas de semi-conducteurs dont le gap entre les deux bandes soit assez étroit (et plus le gap¹ est petit et plus d'autres mécanismes que l'absorption d'un photon peuvent le faire franchir à un électron, ce qui va générer du bruit).

Dans le domaine IR et submm on a donc majoritairement recours à un autre type de détecteur, le bolomètre. Son principe est de mesurer l'élévation de la température d'un matériau suite à l'absorption d'un photon par quelque phénomène que ce soit. Par exemple, il peut s'agir de réseaux de petites antennes métalliques qui vont se coupler au rayonnement, et les mouvements excités dans le matériau vont produire une élévation de température. Pour mesurer cette élévation, on associe le matériau absorbant avec un matériau dont la résistance varie avec la température, le thermomètre, et à l'aide d'un circuit électrique, on mesure cette résistance. Pour que le bolomètre puisse suivre les variations de l'illumination, on connecte le thermomètre à un « bain » dont la température est maintenue constante. Ce type de détecteur est assez ancien : il a servi à mesurer l'énergie reçue du Soleil en 1881 par S. P. Langley. Depuis, ces détecteurs ont été raffinés et miniaturisés ce qui permet aujourd'hui d'en fabriquer des matrices, qui, installées au plan focal des télescopes, réalisent la détection des images. Cette technologie a cependant encore un certain nombre de limites qui introduisent des spécificités de l'imagerie dans le domaine.

Tout d'abord pour mesurer une élévation de température consécutive à l'absorption d'un photon IR ou submm, il faut que le matériau absorbant soit très froid. On parle ici de quelques dizaines de millikelvins, ce qui demande des systèmes de refroidissement extrêmement complexes et coûteux.

Ensuite, ce système mesure des variations et non des niveaux absolus de flux. Le problème de l'étalonnage (c'est-à-dire remonter du signal mesuré à la puissance émise par les sources) devient crucial pour bon nombre d'objectifs scientifiques, et il n'est pas simple car dans ce domaine nous disposons d'assez peu d'objets dont la luminosité soit parfaitement connue.

Enfin ces détecteurs sont souvent affectés de bruits de dérive (ou bruit à basse fréquence). Contrairement au bruit de photon (les fluctuations stochastiques de l'émission des sources) qui peut être combattu en augmentant le temps de pose des observations, ce bruit introduit une dé-corrélation des signaux mesurés qui augmente avec le temps : plus on augmente le temps de pose et plus le signal s'éloigne de la valeur mesurée dans les premiers instants.

¹ Dans les semi-conducteurs, on appelle gap la largeur de la bande interdite, laquelle est l'intervalle d'énergies situé entre la bande de conduction (état de plus basse énergie) et la bande de valence (état de plus haute énergie).

Pour combattre ce bruit il faut moduler le signal incident à une fréquence supérieure à celle du bruit, par exemple en utilisant un mode d'observation où le télescope balaye la scène à observer, en revenant à des instants différents de l'observation sur les mêmes régions de la scène (figure 3).

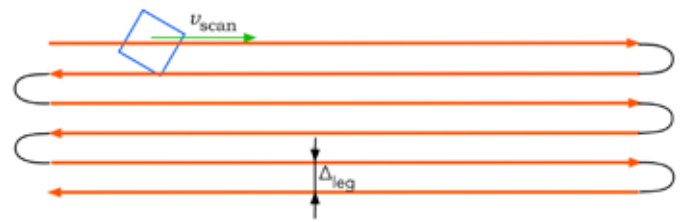


Fig.3. Schéma du mode d'observation en balayage : on utilise le contrôle d'attitude du satellite pour lui faire parcourir des aller-retours sur le ciel (trajectoire rouge), décalés d'une distance inférieure à une fraction de la taille du détecteur (Δ_{leg}), de telle sorte que les bandes de ciel couvertes successivement par le détecteur (représenté par le carré bleu) se recouvrent. Le satellite se déplace à une vitesse constante (V_{scan}) pour contrôler la transformation des fréquences spatiales de la scène en fréquences temporelles dans le signal.

Cette technique, propre au domaine IR et submm, sert aussi à compenser une autre particularité des détecteurs dans ce domaine : leur faible nombre de pixels. En optique, le standard actuel des CCD est de $4\,000 \times 4\,000$ pixels, et ils peuvent être joints pour réaliser d'énormes plans focaux : l'imageur visible du satellite Euclid comporte 36 CCD et a un champ de vue instantané de 0,5 degré carré. En IR et submm, cela ne fait qu'un peu moins de deux décennies que nos détecteurs ne sont plus réalisés pixel par pixel, et à l'heure actuelle, suivant la technologie, nos matrices de détecteurs contiennent au plus quelques milliers de pixels et les champs de vue sont de l'ordre de quelques minutes d'arc. Si l'on revient aux objectifs scientifiques principaux, on réalise que ces champs de vue sont bien plus petits que les objets d'intérêt. La technique de l'observation en balayage permet donc aussi d'observer de plus grandes zones du ciel que simplement le champ de vue imagé par le détecteur. On remarquera au passage que ce mode d'observation transforme le signal spatial de la scène en un signal temporel : la suite des points du ciel observés par chaque pixel au fil du balayage. Ce point n'est pas sans conséquences sur le traitement et la reconstruction de l'image.

Traitement

Au vu des images spectaculaires que chaque mission spatiale publie pour assurer sa notoriété, on peine à imaginer les étapes qui séparent le signal collecté de l'image finale. Pourtant, malgré le soin apporté aux détecteurs, le signal astrophysique est souvent perdu au milieu d'une multitude de sources perturbatrices. L'enjeu de cette étape va être de séparer ces composantes en affectant le moins possible celle qui nous intéresse.

Pour prendre l'exemple du bruit basse fréquence, la

séparation entre bruit et ciel peut se faire dans l'espace des fréquences, en annulant la puissance en dessous d'une fréquence seuil. Ce traitement va cependant affecter les grandes structures spatiales présentes dans le ciel (puisqu'avec l'observation en balayage elles ont été transformées en variations de basse fréquence temporelle). Un traitement plus optimal fait appel aux méthodes de résolution de problèmes inverses : via le mode d'observation en balayage, chaque point de la carte a été observé plusieurs fois, par une série de pixels, à différents instants de l'observation ; le bruit lui est l'addition d'un composant inconnu à chaque instant, mais dont le comportement statistique peut être contraint par des données d'étalonnage (on peut mesurer en laboratoire les propriétés de ce bruit). En introduisant ces contraintes dans un algorithme de minimisation, on peut calculer la carte du ciel la plus compatible avec les mesures et notre connaissance des propriétés du bruit en inversant l'équation qui relie le ciel observé au signal mesuré. La connaissance de la direction instantanée du pointage du satellite devient alors extrêmement importante et c'est pour cela que si les satellites d'observation en IR et submm ont des exigences de pointage absolu relativement faibles (peu importe que le satellite pointe exactement là où on lui demande), elles sont nettement plus grandes sur la connaissance du pointage réel (savoir où le satellite pointait effectivement).

Toujours dans les traitements, notons une autre particularité de l'observation spatiale : la nécessité de filtrer les impacts de particules (voir une illustration de ce phénomène sur la figure 4). En effet, au-delà de l'enveloppe protectrice offerte par l'atmosphère, nos détecteurs sont soumis à un bombardement de particules (électrons, noyaux atomiques). Quand ces particules frappent le détecteur leur énergie est convertie en chaleur et crée un signal parasite. L'observation avec des détecteurs bolométriques présente un certain avantage par rapport à l'observation avec des détecteurs de type CCD : ceux-ci se présentent comme des surfaces pleines et leur section efficace est assez grande, ce qui fait qu'ils interceptent une grande partie des particules. Avec les bolomètres l'absorption du rayonnement est souvent réalisée via une antenne en forme de grille très fine dont la taille de maille est une fraction de la longueur d'onde. Ce sont donc des détecteurs dont la section efficace aux particules est plus faible. Malgré cela, il n'est pas possible de reconstruire des images sans filtrer les impacts. Une méthode efficace repose à nouveau sur l'exploitation du mode d'observation : chaque point du ciel étant observé un grand nombre de fois il est possible de construire pour

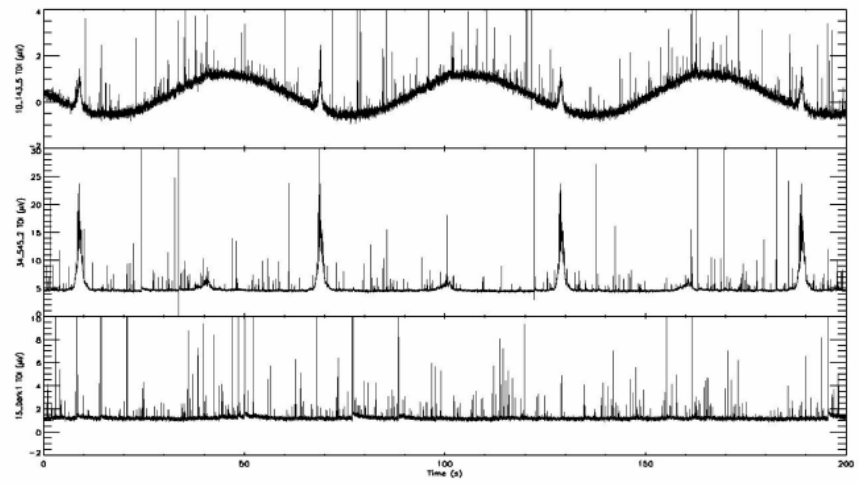


Fig.4. Signal brut enregistré par trois détecteurs de l'instrument HFI dans Planck, le signal du panneau inférieur provenant d'un détecteur «aveugle» c'est-à-dire ne recevant aucun photon du ciel. Sur ces données tous les pics sont des impacts de particules. Deux signaux astrophysiques sont observables à l'œil nu et sont périodiques du fait de la rotation du satellite : le dipôle cosmologique, une oscillation de grande amplitude du signal due au fait que le Système solaire n'est pas au repos dans le référentiel du rayonnement cosmologique fossile, et un pic large lui aussi périodique qui correspond au passage du plan galactique dans le champ de vue des détecteurs. Les fluctuations du rayonnement fossile sont, elles, indétectables avant traitement approfondi (figure tirée de Catalano et al. 2014, *Journal of Low Temperature Physics*, 176). On le voit, les impacts de particules doivent être corrigés si l'on veut avoir accès au signal d'intérêt scientifique.

chaque pixel du ciel la statistique des mesures obtenues en ce point. Les impacts de particules représentent un tel dépôt d'énergie qu'ils sont des points aberrants dans ces distributions et peuvent aisément être filtrés.

Dans ces exemples on remarque un élément caractéristique des méthodes les plus performantes de traitement : l'exploitation conjointe des propriétés connues du détecteur et des particularités du mode d'observation.

Reconstruction

Il s'agit maintenant de produire, à partir des séries temporelles générées par les pixels, traitées pour ne plus contenir que le signal en provenance des sources astronomiques, une image ou carte du ciel telle qu'on se la représente classiquement. Comme je l'ai dit plus haut, une image c'est la représentation d'une information et l'étape de reconstruction est en fait l'occasion de choisir quelle information représenter et de quelle façon. Même si l'on se contente de l'intensité mesurée en chaque point du ciel, il va falloir faire un choix : celui de coder chaque valeur de l'intensité par une couleur ou une gradation de couleur, car dans ce domaine, toute notion de couleur est arbitraire.

On peut aller plus loin car bien souvent la même observation est réalisée à différentes longueurs d'onde, par exemple en disposant plusieurs plans de détecteurs au foyer du télescope (ceci est justement possible car ils sont encore de petite taille, et donc chaque plan n'occupe qu'une fraction du champ offert par le télescope). Avec plusieurs longueurs d'onde on peut reconstruire des cartes en fausses couleurs (la couleur va coder la répartition de l'énergie reçue dans différentes bandes spectrales, comme sur la figure 1a) qui donnent une première

impression des variations spectrales observées dans le champ. Mais l'utilisation d'un modèle d'émission permet de relier les intensités mesurées dans les différentes bandes spectrales à la température et à la densité du milieu observé. On en arrive donc à produire des cartes contenant des informations directement interprétables scientifiquement (comme sur la figure 1b). Bien entendu plus la reconstruction des images s'appuie sur un modèle et plus il sera important d'évaluer les incertitudes liées aux simplifications et approximations apportées par le modèle. Les images reconstruites s'accompagnent alors de cartes d'incertitude (qui sont rarement diffusées au-delà des publications scientifiques).

Conclusion

La réalisation d'images telles que le grand public peut les concevoir est un fait relativement récent dans le domaine IR et submm, puisqu'on peut dire que ce n'est qu'à partir des satellites ISO (1995), Spitzer (2003) et Herschel (2009) qu'elle a réellement pris corps, à la suite du développement de matrices de détecteurs dans ce domaine. Les exigences de ces détecteurs, en particulier

le besoin de cryogénie, font que la maturation des technologies est lente et que les détecteurs sont encore à l'état de prototype. De ce fait la production d'images est un processus dont la complexité est encore apparente contrairement à ce qui peut maintenant être le cas dans le visible (bien qu'elle y soit présente mais bien plus sous contrôle et son traitement intégré à la chaîne de production du signal). Mais en travaillant sur cette complexité avec des méthodes avancées, l'opportunité se présente aussi d'aller au-delà de la simple production d'une image, vers une représentation d'informations plus directement exploitables pour nos objectifs scientifiques.



Mots croisés : images spatiales

Horizontalement

- Comme les images prises par le télescope Hubble.
- Elle va emmener le JWST. On y a fait le pont.
- Il est prévu en novembre pour emmener le JWST. Une onde en a un aussi.
- Abréviation d'une onde lumineuse ou radio. Comme les jumeaux de Langevin.
- Le JWST sera à l'un de ses points.
- Elle guide le peuple pour Delacroix.
- Onde longue abrégée. Note. Station pas spatiale mais thermique.
- Celle en CO₂ dans notre atmosphère ne fait qu'augmenter. Matin anglais.
- Comme le miroir d'un télescope de Foucault.
- Copie. Avant les UFR en fac.
- Ils peuvent être à main ou à dos. Elle a participé au JWST.

Verticalement

- Ils peuvent faire des images depuis l'espace.
- Celui du HST mesure 2,40 m. Comme un marteau.
- Il gêne l'observation au sol. Elle est représentée à l'ESA mais pas à l'UE. Elle est à l'origine du JWST.
- Possessif. Petit astronome ou grand du Clea (prénom).
- Ils seront détectés par le JWST.
- Diminuent le risque de contamination. Note.
- Céréales. Sans dessous dessus.
- Mayennaise bien connue des cruciverbistes. Elles peuvent être brisées.
- Manches. Le JWST en aura une en infrarouge.

Solution p. 47

LES ANTENNES DU BOUT DU MONDE, DEEP SPACE NETWORK

Floriane Michel

Pour s'affranchir de l'obstacle que constitue l'atmosphère au passage de certains rayonnements, les scientifiques envoient dans l'espace de nombreuses sondes afin d'ausculter l'Univers. Ces sondes recueillent des informations qu'il faut ensuite transmettre sur Terre. Pour cela une série d'antennes de grands diamètres sont réparties de manière adéquate afin de couvrir l'ensemble du ciel en permanence. C'est également à partir de ces antennes que s'effectue le pilotage des sondes.

Canberra est la capitale méconnue de l'Australie, coincée entre Sydney et le mont Kosciuszko (le plus haut d'Australie, 2 228 m...), la ville où il y a plus de kangourous que d'habitants. Pourtant, c'est là que se trouve le Canberra Deep Space Communication Complex, une des trois stations de communication du Deep Space Network de la NASA, les deux autres se trouvant à Madrid en Espagne et à Goldstone aux États-Unis.

Ce réseau d'antennes radio permet à la NASA de rester en contact avec les sondes qui sillonnent le Système solaire, voire plus loin et ce, quel que soit le continent « en face » de la sonde. Les stations sont espacées d'environ 120° ce qui permet de

couvrir l'ensemble du ciel et de faire le relais entre les antennes ; lorsqu'une sonde va passer sous l'horizon de l'une d'entre elle et donc perdre la communication, une autre prend le relais assurant ainsi une continuité dans l'échange des signaux.

Ce réseau d'antennes permet de recevoir, décoder et distribuer les données prises par les sondes, d'envoyer des commandes mais également de mesurer leur position et leur vitesse dans l'espace. Ces signaux peuvent également être utilisés dans certains cas pour étudier la structure intérieure d'une planète ou d'un satellite en étudiant les modifications du signal entre son émission par la sonde et sa réception

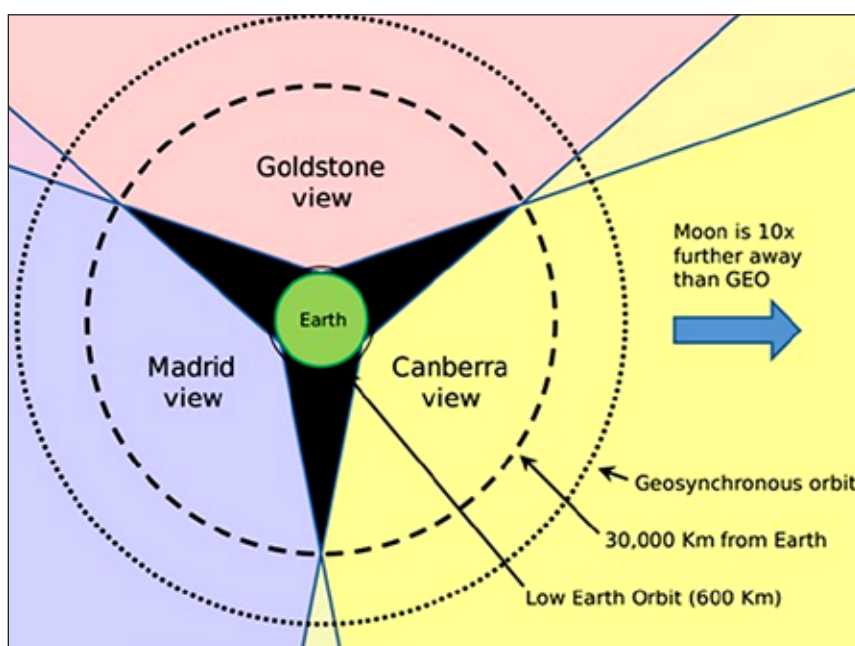
par la station. Les signaux reçus étant très faibles, toutes les stations sont construites dans des vallées afin de limiter les interférences extérieures.

Les antennes

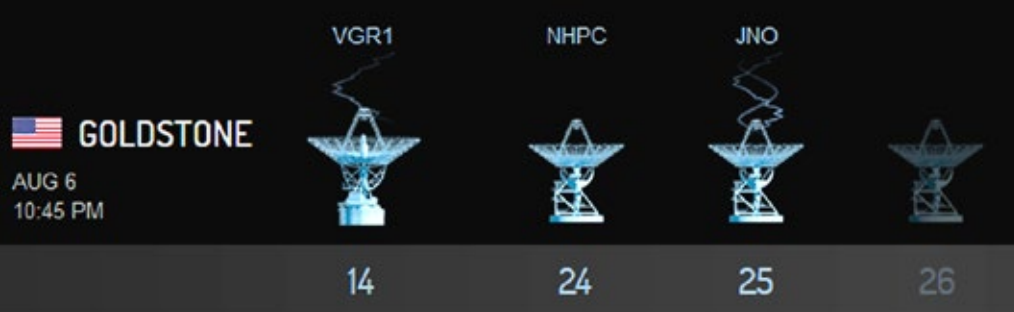
Chaque site peut contenir quatre types d'antennes : 70 et 26 mètres de diamètre ainsi que deux types d'antennes de 34 m (High Efficiency et Beam waveguide). Elles sont nommées DSS (DSS pour Deep Space Station), suivi d'un numéro variant en fonction du site (entre 30 et 49 pour Canberra par exemple).

Plus le diamètre est grand, plus l'antenne est capable de recevoir des signaux de faible puissance. À titre d'exemple, les antennes de 70 m de diamètre ont été construites dans le but de communiquer avec Voyager 1 et 2 qui sont à présent à plusieurs milliards de kilomètres de la Terre.

Les antennes de 26 m ont quant à elles été construites pour communiquer lors des missions Apollo qui nécessitaient une précision moindre, la Lune étant beaucoup plus proche. Elles servent à présent pour échanger des informations avec des satellites en orbite autour de la Terre. Les antennes de 34 m servent à communiquer avec toute une gamme de sondes explorant le Système solaire, des rovers sur Mars jusqu'à Juno autour de Jupiter.



La répartition des 3 antennes (source : NASA).



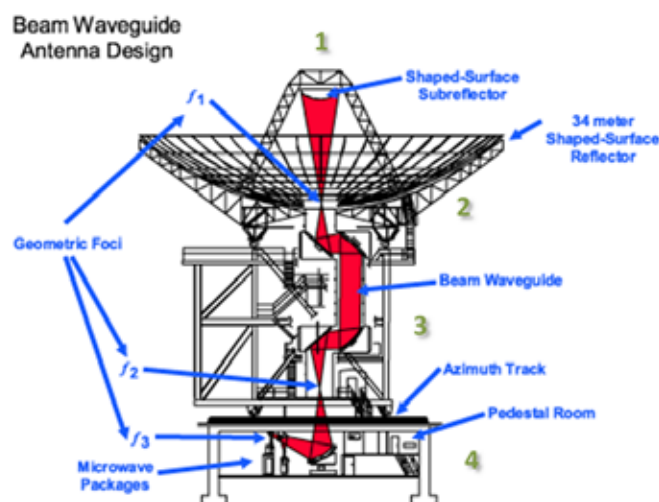
Le 5 août, à Goldstone, l'antenne de 70 m DSS14 communique avec Voyager 1, l'antenne de 34 m DSS24 avec la mission New Horizons vers Pluton et DSS25 avec la sonde Juno.

Les antennes de 70 m de diamètre sont les plus coûteuses en pièces détachées et en maintenance. Pour les remplacer, des essais ont déjà été réalisés en utilisant plusieurs antennes de 34 m en réseau.

Lorsqu'une sonde envoie un signal, celui-ci est déjà faible au départ en raison du peu d'énergie disponible (20 W soit l'équivalent d'une ampoule de réfrigérateur). Ce signal est envoyé en direction de la Terre

les antennes Beam waveguide (guidage d'onde).

Contrairement aux antennes « High Efficiency », les émetteurs et récepteurs des antennes à guidage d'onde (et toute l'électronique qui va avec) sont à l'abri du vent, de la pluie mais surtout des changements de température que les composants électroniques n'aiment pas, dans un hangar à la base de l'antenne.



Une antenne Beam Waveguide (source : NASA).

mais perd en directivité lors du voyage. Il n'arrive que 10^{-19} W sur Terre dans le cas de Voyager 2. Le signal étant disponible sur une large surface, il est donc possible d'utiliser plusieurs antennes réparties à différents endroits pour reconstituer le signal. Un essai a été fait avec jusqu'à 5 antennes de 34 m pour la mission Galileo : cela a permis d'améliorer la précision du signal d'un facteur trois par rapport à une antenne de 70 m.

Ces dernières sont donc amenées à disparaître au profit d'antennes plus petites et plus performantes comme

Bien que le système de guidage soit complexe en raison du fait qu'il doit traverser la monture de l'antenne sans pour autant empêcher sa rotation, ces antennes permettent d'obtenir des mesures plus fiables et facilite la maintenance.

Canberra Deep Space Communication Center

Construite proche de la capitale pour contribuer à son développement qui se faisait attendre, la station a commencé à émettre en décembre 1964.

Quatre antennes sont actuellement

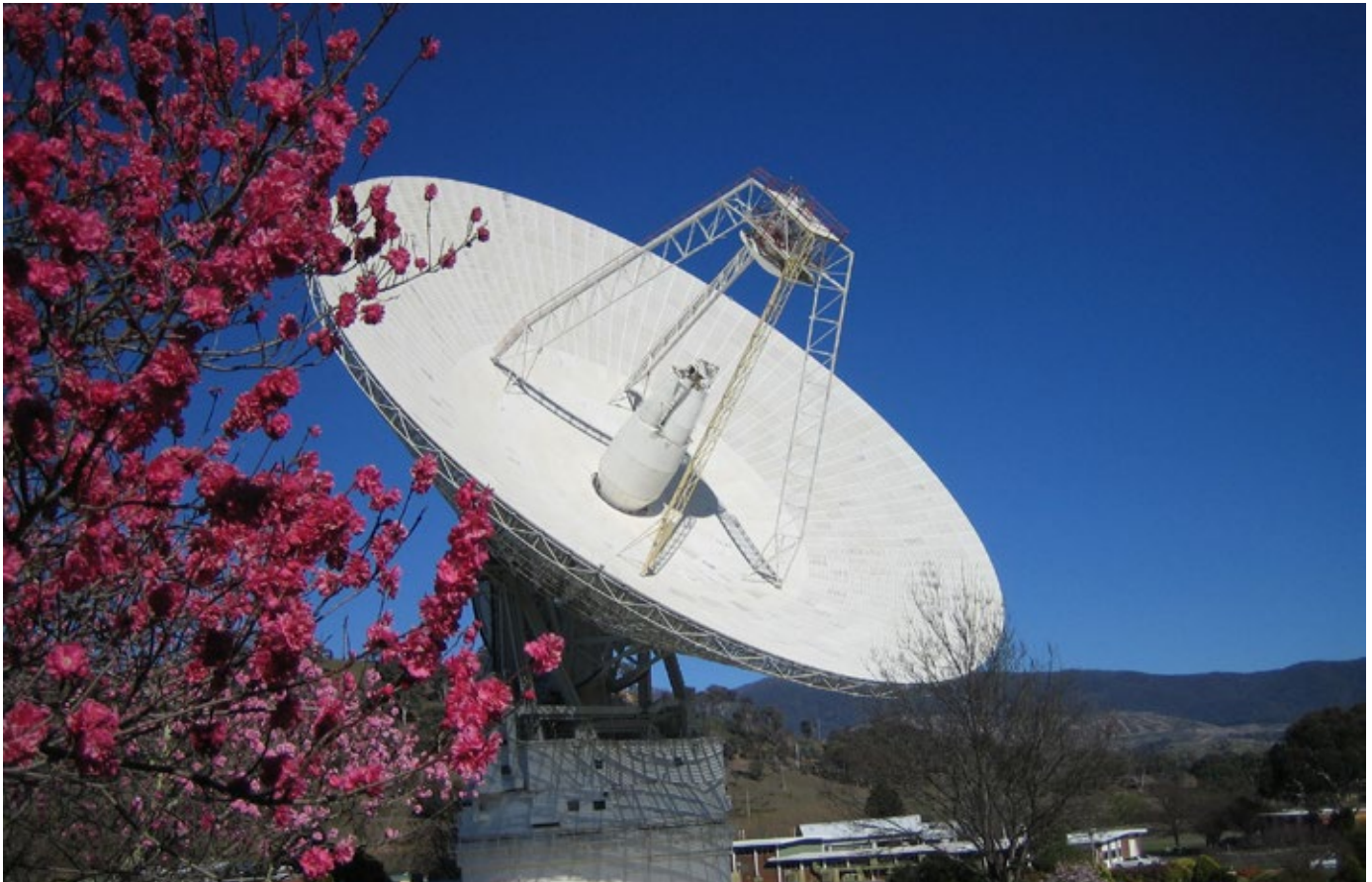
en activité : une antenne de 70 m et trois de 34 m de type « beam waveguided ».

Le site de Canberra possédait une antenne de 26 m, la DSS-46 jusqu'en 2009. Cette antenne est connue pour avoir reçu les images du premier pas sur la Lune de Neil Armstrong en 1969 lorsqu'elle était sur le site de Honey Suckle Creek, démantelé en 1984. Cette antenne a été déclarée « Historical Aerospace Site » et est donc restée sur le site proche de Canberra où l'on peut facilement la voir.

L'antenne la plus impressionnante du site de Canberra est la DSS-43 de 70 m de diamètre construite en 1973. Elle mesurait 64 m puis a été élargie en 1987 afin d'assurer les communications avec Voyager 2 lors de son approche de Neptune en 1989. Elle pèse plus de 3 000 tonnes, mesure 73 m de haut et est très impressionnante vue de près car sa surface est environ celle d'un terrain de football. Elle peut tourner à une vitesse de $0,25^\circ$ par seconde et a une précision de pointage de $0,005^\circ$.



L'antenne Honeysuckle. La salle d'émission est la structure carrée située directement sous l'antenne. Photos par Hamish Lindsay, scan par John Saxon.



DSS43, l'antenne de 70 m de diamètre.

Les types de données collectées par le DSN

Il existe 7 types de données qui transitent par les antennes.

- **Frequency and Timing** : données essentielles au bon fonctionnement du DSN, ses données constituent l'horloge interne du réseau. Les différents sites restent synchronisés en comparant leurs données aux données des satellites, notamment GPS.
- **Tracking** : données permettant de déterminer la distance (à 1 m près), la vitesse (au mm/s près). Elles sont obtenues en faisant des calculs de temps de parcours de signaux et par effet Doppler.
- **Telemetry** : données provenant de mesures prises par la sonde (température, pression, images...). Lors de l'envoi des données, la sonde code un symbole correspondant au type de mesure avant l'envoi des valeurs. Ce symbole permet alors d'encoder les mesures qui sont ensuite transmises à l'équipe du projet.
- **Command** : données transmises par l'équipe sur Terre à la sonde. Ce sont des commandes que la sonde exécute après les avoir chargées dans l'ordinateur de bord.
- **Monitor** : données sur les opérations et les performances

du DSN lui-même. Elles permettent d'informer/gérer des projets et coordonner les sites entre eux. Les équipes des projets fournissent en général un set de données moniteur avec celles de tracking pour informer sur la force du signal par exemple.

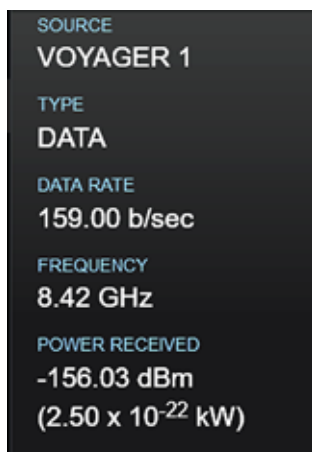
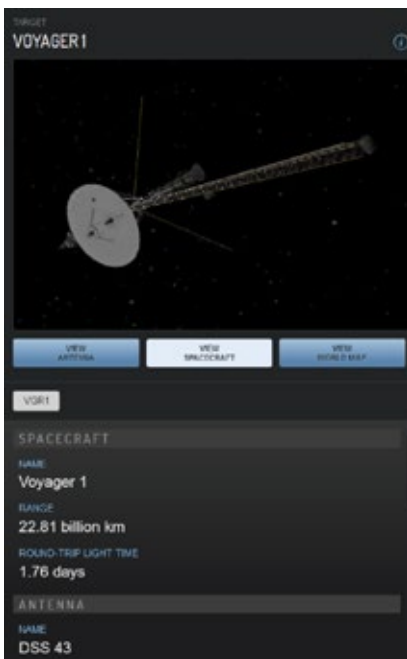
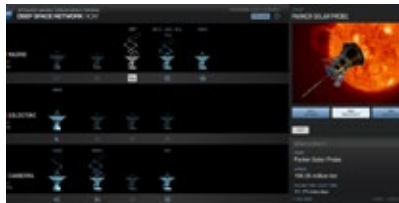
- **Radio Science** : données relatives aux expériences faites en utilisant le système sonde-antenne comme un instrument de mesure. Ses données permettent par exemple de déterminer l'atténuation, la réflexion, la variation de fréquence du signal émis par la sonde lors de sa réception par le DSN et d'obtenir ainsi des informations sur l'atmosphère d'un astre, des anneaux ou autre champ gravitationnel.

- **Very Long Baseline Interferometry** : données obtenues lorsque deux ou plusieurs antennes reçoivent des signaux de la même sonde ou du même quasar. Elles permettent de trouver la position précise des antennes par exemple ou d'obtenir des images d'objets astronomiques. Toutes ces données permettent de mieux comprendre le rôle et les missions du DSN.

Position et vitesse des sondes spatiales

Pour mesurer la position des sondes, les antennes au sol envoient un signal (uplink) sur une des fréquences ci-dessous.

Pour les enseignants, sur le site DSN Now, on peut voir en temps réel les communications entre les antennes et les sondes avec plein de données pour faire des exercices avec les élèves : la distance entre la sonde et l'antenne, le temps de trajet des signaux, leur fréquence, le débit, la puissance reçue par l'antenne entre autres.



Page du site du Deep Space Network indiquant l'état des différentes antennes des 3 sites (<https://eyes.nasa.gov/dsn/dsn.html>).

Band	Uplink Frequency (MHz)	Downlink Frequency (MHz)
S	2110 - 2120	2290 - 2300
X	7145 - 7190	8400 - 8450
Ka	34200 - 34700	31800 - 32300

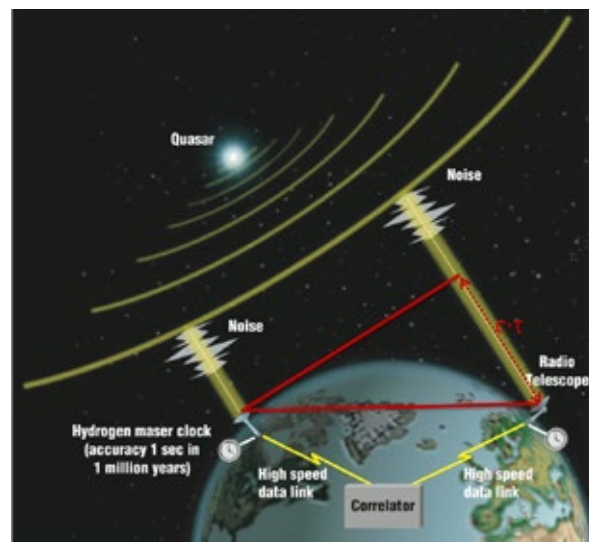
Ce signal porteur est modulé en phase par un signal de « traçage ». À sa réception par la sonde, le signal est démodulé, filtré puis monté sur le signal porteur (d'une autre fréquence que le signal uplink) en modulation de phase et envoyé en direction de la Terre. Le temps de trajet entre l'antenne et la sonde est alors estimé en comparant les signaux de traçage envoyé et reçu. À ce temps, sont soustraites différentes contributions indépendantes du temps de trajet dont le temps de traitement par la sonde déterminé par des tests effectués avant le lancement (environ 420 ± 9 ns pour Cassini), les temps de trajet du signal entre l'émetteur et l'antenne dans les cas des antennes beam waveguide (quelques microsecondes, calibration faite avant chaque utilisation), les effets de l'atmosphère entre autres. Lorsque l'on a identifié le temps de parcours réel, connaissant la vitesse de la lumière, il en découle alors la distance entre la sonde et la station.

Cette distance ne permet cependant pas de connaître la position exacte de la sonde car elle ne donne pas d'information sur les composantes latérales de la vitesse ou de la position. Des techniques complémentaires sont alors utilisées telles que l'analyse de photos envoyées par les sondes qui montre les étoiles et permettent ainsi de préciser sa position. De plus, les équations de trajectoires sont très bien connues et il n'y a pas un grand panel de trajectoires possibles qui peuvent correspondre à un échantillon de mesures.

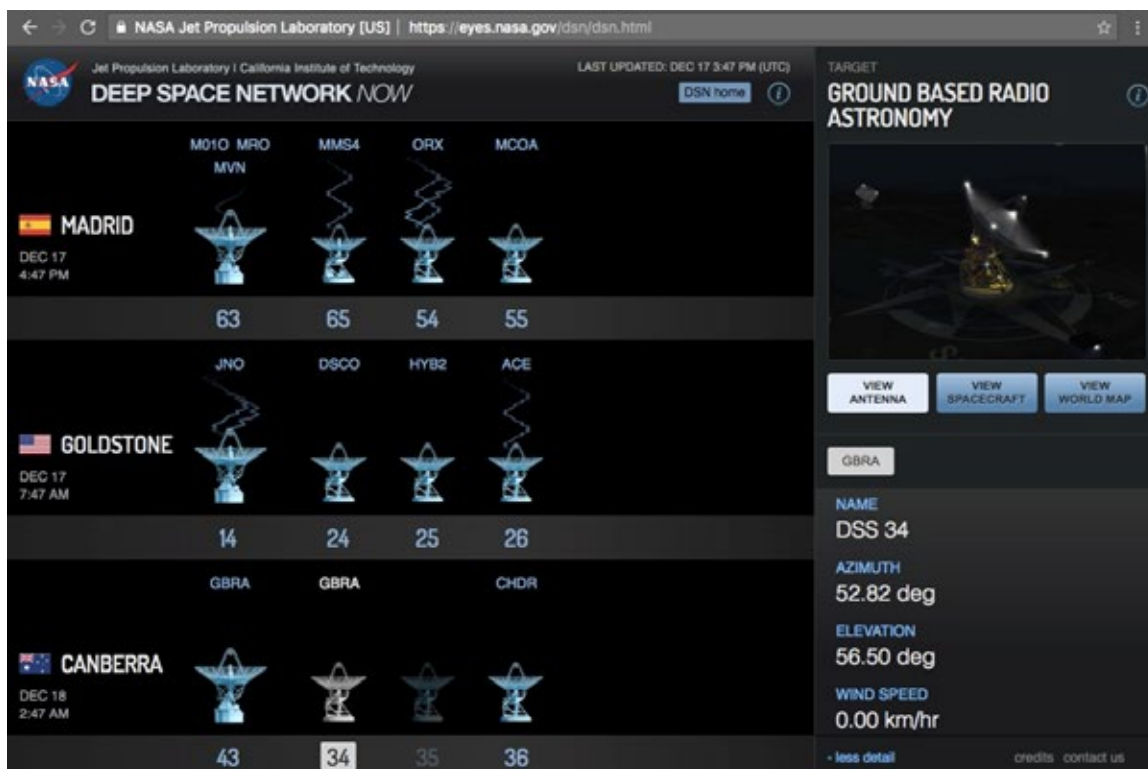
La vitesse de la sonde est quant à elle calculée grâce à l'effet Doppler. La fréquence émise par la sonde est comparée à la fréquence reçue sur Terre. Cela permet d'en déduire la vitesse relative entre la sonde et l'antenne.

Ces mesures sont ensuite soustraites aux valeurs théoriques calculées à partir des modèles de la trajectoire de la sonde ; ce résultat s'appelle « the residual » ou le résidu et permet de mesurer à quel point la sonde a dérivé par rapport à son orbite de référence.

En fonction des résultats, il peut alors être décidé d'opérer des corrections de trajectoires (Trajectory Correction Maneuver ou TCM si la correction est de l'ordre de la dizaine de m/s mais il existe d'autres types d'ajustements



Principe de la VLBI (source NASA).



pouvant aller jusqu'au mm/s). Une série de commandes est alors programmée et transmise à la sonde par l'intermédiaire du DSN.

Une fois les corrections effectuées, des mesures de distance et de vitesse sont à nouveau prises et comparées à l'orbite théorique, etc.

Cassini par exemple a exécuté 17 TCM durant les 7 ans qu'ont duré son voyage jusqu'à Saturne et plusieurs autres ajustements par la suite afin de pouvoir observer Titan et d'autres satellites.

Utilisation du réseau pour la recherche

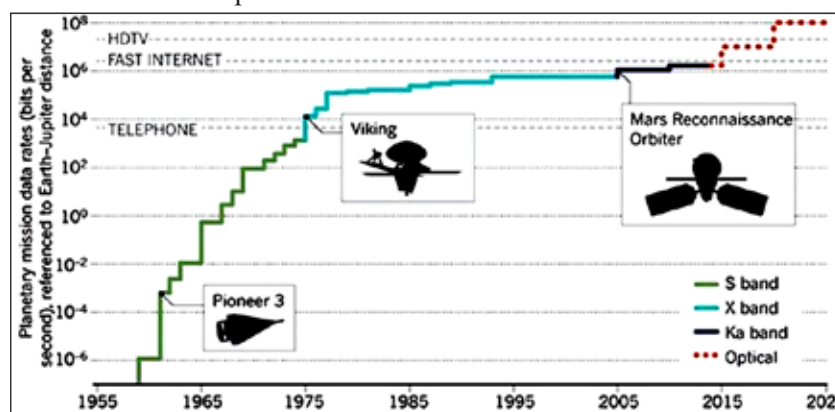
En plus de communiquer avec les sondes, le Deep Space Network consacre également environ 3 % de son temps à soutenir les recherches basées sur des observations faites depuis le sol. En effet, les antennes peuvent servir de radiotélescope. Elles sont très sensibles, déjà organisées en réseau et leur position très éloignées les unes des autres permet d'avoir la meilleure précision de calcul possible pour des appareils sur Terre. Elles viennent donc en soutien à un réseau de télescopes qui utilise, entre autres, une technique

appelée VLBI (very long baseline interferometry). Cette technique mise au point dans les années 60, consiste à mesurer la différence entre les horaires d'arrivée sur Terre d'ondes radio émises par un quasar (tellement éloigné que les ondes émises sont considérées comme planes). En raison de la petite taille de la Terre, la précision de mesure du temps est cruciale (quelques picosecondes) et les horloges atomiques des antennes sont un outil indispensable au bon fonctionnement de cette technique. Cela permet dans un premier temps de mesurer la position des quasars. Ceux-ci étant très éloignés de la Terre, leur position peut être considérée comme fixe, et on peut donc à l'inverse mesurer la position des antennes avec une précision de

quelques millimètres !

Il est alors possible d'étudier le mouvement des plaques tectoniques ou des déformations géologiques. C'est également cette technique qui a permis de faire la fameuse image d'un trou noir publiée en 2019.

Utilisé depuis les années 1960, le réseau d'antennes de la NASA évolue pour s'adapter aux nouvelles technologies, aux débits nécessaires toujours plus élevés (passage aux transmissions optiques) et être de plus en plus précis. Il a de beaux jours devant lui et peut servir de support pour une panoplie d'exercices à faire avec les élèves !



Évolution des débits de communications entre 1955 et 2025.

À L'ÉCOLE, RETROUVER LA POSITION DE LA SONDE SOLAR ORBITER (À PARTIR D'UNE IMAGE PRISE PAR CELLE-CI)

Joël Lebras (Planète Science)

Séquence de médiation scientifique réalisée à l'école Mendès-France de Créteil, classe de Madame Laetizia Sisco, dans le cadre d'Interventions en Temps Scolaire (ITS) mis en place par la Maison des Jeunes et de la Culture, avec l'aide de la Municipalité. Le médiateur émane du réseau Planète Sciences.



Solar Orbiter est une sonde d'exploration solaire lancée en février 2020, ayant pour but de mieux connaître l'activité et l'environnement solaires, notamment sur le plan des ondes radio et plasma, des températures et des champs magnétiques. Cette science ne pouvant concerner le premier degré de l'enseignement, c'est la trajectoire de la sonde qui a intéressé notre classe. Le défi posé par cette séquence était de retrouver la position de la sonde à une date où celle-ci avait pris une photo où trois planètes étaient visibles, cela dans un programme d'activité centré sur la découverte du Système solaire (cycle 3).

La première étape consiste à consolider chez les élèves la représentation du Système solaire et de son fonctionnement. La seconde, à observer et interpréter l'image pour en déduire la position de la sonde.

Après remontée des représentations initiales, il s'avère que les deux niveaux (CE2 et CM2) ont des connaissances comparables et que les différences sont individuelles. Ils

connaissent la structure générale du système, la position centrale du Soleil, le nombre de planètes et les deux mouvements principaux de la Terre. Ils savent que le Soleil est une étoile.

Dans un premier temps, l'ordre des planètes est rappelé et partagé, en portant l'attention sur la place de la Terre, puis un schéma très sommaire a été réalisé au tableau par les enfants. Consignes :

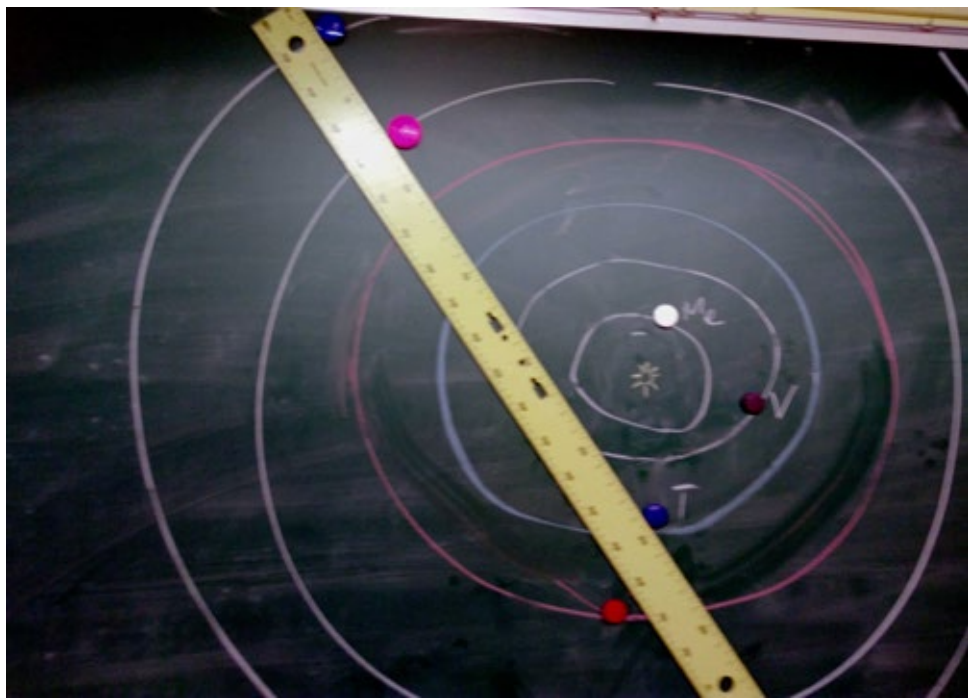
- commencer par la dernière planète pour être certain de pouvoir les faire entrer toutes ;
- ne pas chercher à respecter les rapports de distances ;
- laisser néanmoins une distance plus large entre la quatrième et la cinquième planète ;
- indiquer par des flèches le sens de révolution (connu de certains élèves).

Nous avons remarqué que le chemin à parcourir par chacune (sa circonférence), est de plus en plus long à mesure qu'on s'éloigne du Soleil. Nous n'utilisons pas « Pi », qui n'est pas du niveau des CE2, mais seulement

une estimation à l'œil et un appel au raisonnement. Au tableau, on peut utiliser cet artifice : mimer un marcheur avec l'index et le majeur et suivre les orbites en comptant les « pas ».

Dans un second temps, nous procédons au petit « jeu » bien connu, dans la cour de l'école : « La Ronde des Planètes ». Il consiste à faire jouer aux enfants le rôle des planètes en termes de révolution, autour d'un Soleil symbolisé. On met en place les quatre premières planètes d'abord avec des consignes lâches (« à mon top, tournez autour du Soleil »). Comme très rapidement l'entropie gagne, on demande aux élèves de proposer des améliorations ; assez vite les révolutions s'organisent et finissent par ressembler, dans son principe, au Système solaire. On constate qu'une chose est d'avoir, pour un élève de l'élémentaire, intégré un schéma du Système solaire, une autre est d'intégrer son « fonctionnement ». On isole enfin les positions remarquables : opposition, conjonctions, pour finir par l'alignement du 21 décembre : l'adulte, qui connaît les positions, place lui-même les élèves aux bonnes places. On échange au besoin les places entre « acteurs » et « observateurs » pour que les constats soient partagés : vues de la Terre, Jupiter et Saturne sont alignées et paraissent très proches.

Forts de cette expérience, les élèves refont avec plus d'assurance le schéma du système au tableau puis sur



une feuille, et replacent les planètes dans la position remarquable du 21 décembre 2020. Nous y traçons la droite marquant l'alignement rarissime Terre-Jupiter-Saturne (ci-dessus, la règle indique l'alignement).

Seconde étape, l'innovation consistait, à partir de ces acquis consolidés, à interpréter une image prise par Solar Orbiter en novembre 2020 assez finement pour replacer la sonde à sa place approximative entre les planètes à la date de l'image (planètes et dates mentionnées en anglais). La séquence a commencé par la visualisation (sur écran puis impression papier individuelle), de la photo prise par Solar Orbiter (ci-dessous), et son interprétation : planètes (indiquées), étoiles. L'image en question, ci-dessous, (non encore publiée à l'époque et utilisée ici avec l'autorisation des chercheurs), a été obtenue grâce à l'un des P.I. (Principal Investigators) et parrain de la classe



dans le cadre du suivi pédagogique de l'Observatoire de Paris (Milan Maksimovic). Les planètes visibles sur l'image ont été identifiées par les scientifiques.

Nous relevons sur l'image des indices, comme la place des planètes entre elles ou la position probable du Soleil ; celui-ci n'est pas visible mais nous supposons justement qu'il est à droite de l'image au vu du halo lumineux. Nous émettons des hypothèses sur la nature des autres points (étoiles), sur les différences importantes d'éclats d'une planète à l'autre. Les élèves interprètent correctement cette différence par les distances, avec un doute s'agissant de Mars vu sa taille. Nous notons au tableau ces informations.

Chaque élève trace un nouveau schéma partiel du Système solaire sur une feuille A4, avec seulement Vénus, la Terre et Mars. Le « défi » est de placer dans le schéma la Terre, Vénus, Mars et la sonde. Nous commençons par positionner la Terre sur son orbite à une place arbitraire mais la même pour tous, choisie par le médiateur. Les positions des deux autres planètes et de la sonde doivent en être déduites de celle-ci en utilisant l'ensemble des données issues de l'interprétation collective et notées au tableau, c'est-à-dire :

- Le Soleil est hors de l'image et à droite de celle-ci.
- La planète la plus proche de la sonde est Vénus.
- La deuxième planète la plus proche est la Terre.
- Mars est probablement la plus éloignée (hypothèse à vérifier).
- Vues de la sonde, les planètes Vénus, Terre et Mars doivent être visibles de gauche à droite dans cet ordre.

La première donnée permet d'isoler une moitié du système où devait se trouver la sonde.

La seconde donnée permet d'isoler une zone proche de l'orbite de Vénus.

Les troisième et quatrième données permettent d'éliminer des positions impossibles pour la Terre et Mars.

La cinquième donnée permet de « préciser » les positions de celles-ci une fois éliminées les positions impossibles. C'est ici le seul moment où les différences entre CM2 et CE2 soient apparues. À partir d'une consigne de procéder par approches successives et vérifications, le rôle du médiateur et de l'enseignante consiste à s'assurer que pour les positions que les élèves proposent, toutes les conditions sont bien remplies, et à suggérer d'améliorer l'hypothèse si ce n'est pas le cas. Les premiers élèves ayant réussi l'exercice sont amenés à aider les autres. Cet exercice s'est révélé particulièrement ambitieux, exigeant des élèves qu'ils s'imaginent à la place de la sonde et voient le « paysage » planétaire comme elle le voyait. Cette capacité d'abstraction n'était sans doute pas entièrement acquise par tous ; cependant, les uns après les autres, ils ont correctement positionné la sonde, Vénus et Mars avec une approximation qui aurait permis, avec les outils adéquats, d'en trouver la médiane et d'en vérifier la pertinence sur le site de l'ESA (qui offre une animation en temps réel du voyage de la sonde).

Vu l'ambition affichée et le caractère expérimental de l'activité, les résultats obtenus par les élèves se sont révélés étonnamment corrects, c'est-à-dire dans un empan d'approximation permettant d'éliminer le hasard et d'être certain que le principe avait été compris. Bien entendu, certaines données manquantes comme la diagonale en degrés de l'image ne permettaient pas d'aller plus loin mais cela aurait été impossible avec des enfants de ces âges. Il semblerait que l'expérience gagne, d'une part à être reproduite avec des élèves du secondaire, et d'autre part à être menée avec d'autres élèves du cycle 3, afin de s'assurer que des résultats comparables puissent ou non être obtenus.

■

Les images prises depuis l'espace dans les productions du Clea

Dans les anciens numéros des Cahiers Clairaut (<http://clea-astro.eu/archives>).

(Tous les numéros de plus de 3 ans sont en libre accès sur notre site <http://clea-astro.eu>, archives des CC).

Panorama de la radioastronomie, CC 163 (2018), Julien Girard.

Images astronomiques, CC 156 (2016), Cécile Ferrari.

Les images sont-elles trompeuses ? CC 134 (2011), Daniel Kunth.

Instruments du futur : les enjeux, CC 128 (2009), Cécile Ferrari.

Une nouvelle classe de galaxies, CC 44 (1988), Lucienne Gouguenheim (galaxies en IR).

Le ciel infra-rouge observé par IRAS, CC 27 (1984), Lucette Botinelli.

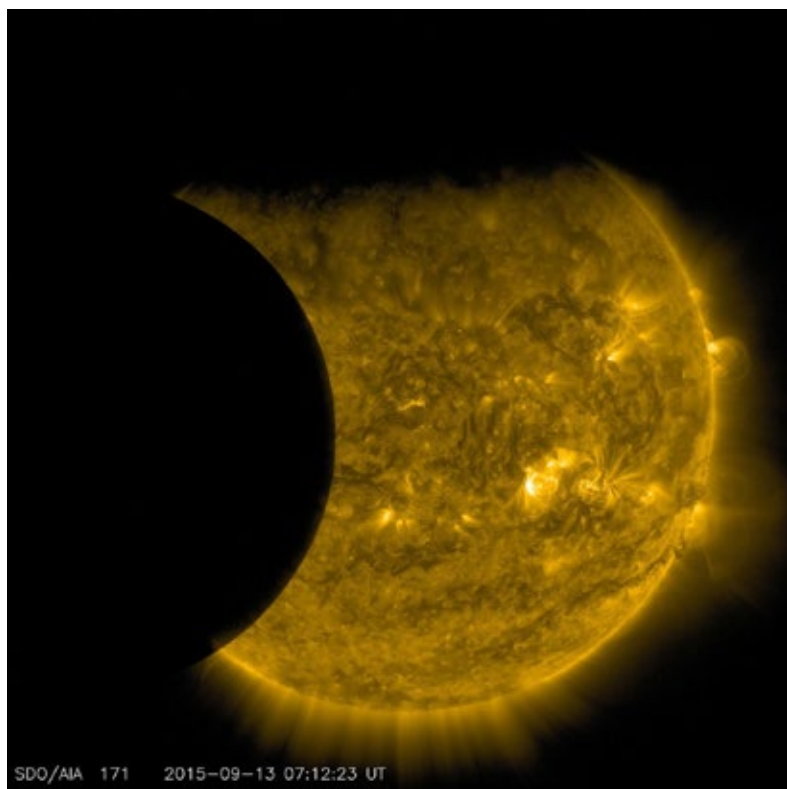
Sur le site du CLEA (<http://www.clea-astro.eu>), onglet lunap

Vous trouverez des infos en cliquant sur les termes suivants de l'index :

Détection des ondes, Rayonnement gamma, Rayonnement IR, Rayonnement UV, Rayons X.

LECTURE D'IMAGES PRISES DEPUIS L'ESPACE

DEUX PETITS PROBLÈMES POUR VOUS ET VOS ÉLÈVES



Cette image a été réalisée par SDO, un satellite d'observation du Soleil en orbite autour de la Terre. Comment la comprendre ? Que peut-on en déduire ?

Solution

On voit nettement deux objets cacher le Soleil, l'un est net, l'autre semble flou. On peut deviner que l'objet sombre le plus net est la Lune alors que l'autre est la Terre, le flou étant dû à l'atmosphère terrestre.

Les trois astres Soleil Terre et Lune sont approximativement alignés, c'est donc une pleine Lune ou une nouvelle Lune. Il est difficile de trancher puisque qu'on ne voit pas lequel, de la Terre ou de la Lune, est au premier plan. Heureusement, la date notée sur la photo (13/09/2015) permet de savoir que c'est une nouvelle Lune.

On a donc l'alignement dans cet ordre de SDO, la Terre, la Lune et le Soleil.

Quel autre renseignement peut-on obtenir ?

Il est possible, à partir de la photo, de trouver à quelle distance de la Terre se trouve SDO. Pour cela, on peut se servir des diamètres de la Lune et du Soleil sur la photo, pas de celui de la Terre, trop difficile à obtenir. si on veut trouver un résultat pas trop mauvais, il faut savoir que ce jour-là, la distance Terre Lune était de 406 000 km. Vous pouvez alors vous amuser à faire le calcul, vous devriez trouver un peu plus de 40 000 km.



Voici une image de notre planète. A-t-elle pu être prise depuis la Lune ?

Solution

On reconnaît le Mexique au centre avec la presqu'île de la Basse Californie en haut à gauche, la presqu'île du Yucatan, en bas à droite, à moitié sous les nuages. Visiblement, on voit beaucoup moins qu'une moitié de globe. La photo a donc été prise « d'assez près », sûrement pas depuis la Lune.

Toutes les images prises par des satellites en orbite basse ne montre qu'une toute petite partie du globe. Cette image a été réalisée par le satellite Suomi NPP qui orbite à environ 830 km de la surface terrestre. Un petit calcul montre qu'il ne peut montrer sur une photo que 6 % de la surface terrestre.

LES DÉFIS NAMAZU POUR TRAVAILLER SUR LES MISSIONS MARTIENNES DE LA NASA

Guillaume Coupechoux, guillaume.coupechoux@ac-nice.fr
Enseignant chargé de mission laboratoire Géoazur, Valbonne

La cellule éducation du laboratoire Géoazur de Valbonne propose des activités destinées aux élèves de collège ou à des jeunes de clubs astronomiques pour travailler sur les données des missions martiennes de la NASA (Insight 2018 et Mars 2020).

Actuellement sur Mars, deux missions de la NASA étudient la planète rouge. L'une d'entre elle, la mission InSight a pour principal objectif la mesure des vibrations du sol grâce à un sismomètre, afin de mieux comprendre la structure interne de la planète. L'autre, la mission Mars2020, a déployé un rover nommé Perseverance qui se déplace sur le sol martien pour étudier les roches, en collecter des échantillons qui seront plus tard ramenés sur Terre et rechercher des traces d'une vie passée.

Si vous voulez faire travailler vos élèves sur les missions martiennes Mars2020 et InSight, les défis Namazu peuvent être une opportunité à saisir.

Présentation des défis Namazu et de leurs objectifs pédagogiques

En lien avec les équipes scientifiques (*science teams*) de ces missions, la cellule éducation du laboratoire Géoazur de Valbonne construit depuis plusieurs années un cadre idéal pour parler de Mars au travers de ces défis.

Chaque défi commence par une partie QCM et/ou réponses courtes qui pousse les élèves à réfléchir sur

des documents simples et les incite à rechercher des informations. Cette partie est riche en accroches pour toutes les disciplines scientifiques. Certains collègues laissent leurs élèves se débrouiller de manière autonome dans cette partie et ils reprennent en cours ou en club les notions sur lesquelles ils veulent insister.

Les questions n'étant en rien hors de portée de collégiens, elles permettent aux élèves de prendre confiance et de se lancer dans les défis. Elles sont aussi idéales car elles ne nécessitent pas de connaissances préalables.

Initiés en 2014 dans le cadre de l'opération « SISMOS à l'École », les défis Namazu étaient à leur début centrés sur la sismologie terrestre ; le nom « Namazu » provient d'ailleurs d'un poisson chat géant de la mythologie japonaise à l'origine de tremblements de terre.

Cependant depuis 3 ans, la sismologie est devenue martienne grâce à InSight (atterrissage le 26 novembre 2018) et maintenant la mission Mars2020 augmente les pistes pédagogiques possibles.

En 2014, les enseignants intéressés étaient quasi exclusivement des enseignants de SVT. Au cours des années, les thématiques des défis ont

évolué et par là même le profil des enseignants qui sont aujourd'hui issus de toutes les disciplines scientifiques (technologie, mathématiques, SVT, PC, SI, SNT et NSI). Par conséquent, aucune crainte à avoir quelle que soit votre discipline et quel que soit le niveau de vos élèves. Les défis Namazu pourront les intéresser.

Ces défis permettent de travailler les notions et compétences suivantes :

Notions utilisées :

- Sismologie
- Spectrométrie
- Géosciences en général
- Programmation

Compétences travaillées :

- Recherche d'information
- Analyse de documents
- Travail en groupe
- Maîtrise d'outils numériques
- Réalisations techniques

Les collègues font travailler leurs élèves lors de clubs et d'ateliers scientifiques, ou pour une classe à projet, ou pour des travaux facultatifs à faire à la maison. L'important est au final l'amusement, la découverte et la motivation sur un travail différent.

Exemples de question.

Voici trois exemples de questions issues des défis Namazu ainsi que les réponses issues d'établissements scolaires.



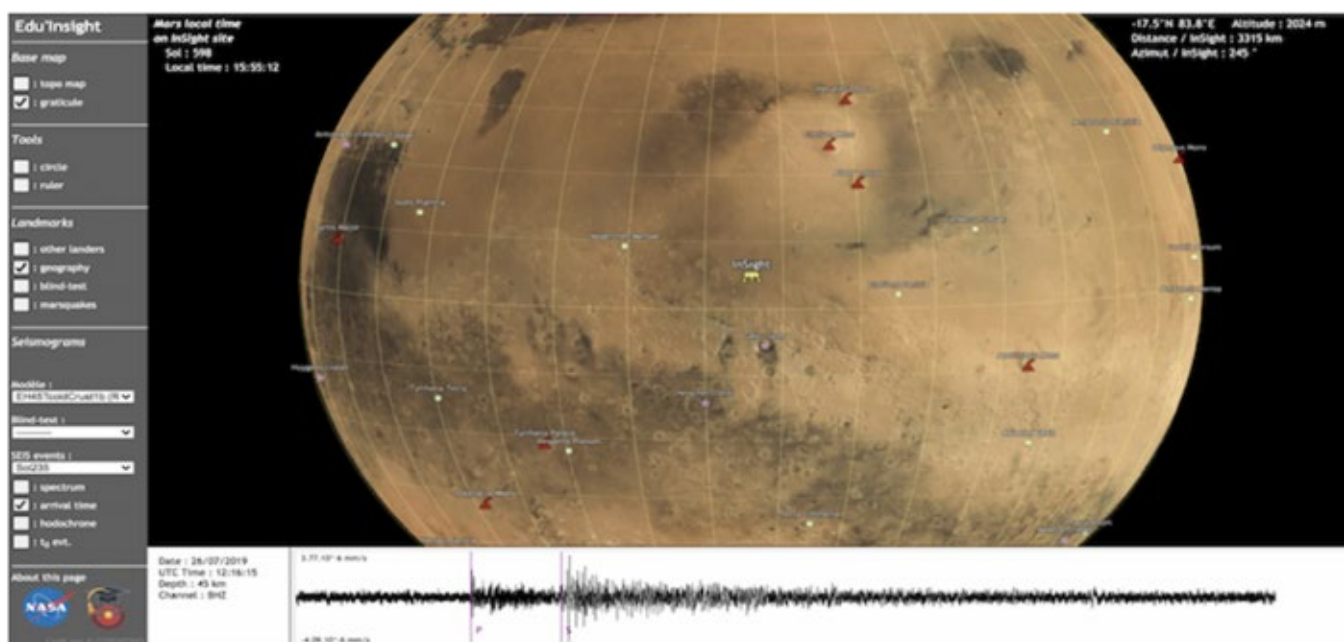
Q4. Imaginons une course entre le rover Perseverance, le rover Curiosity et l'escargot le plus rapide au monde (0,0275m/s – championnat du monde de 2006). Quel serait le podium ?

- 1/Perseverance, 2/Curiosity, et 3/Escargot
- 1/Curiosity, 2/Perseverance, et 3/Escargot
- 1/Curiosity, 2/Escargot, et 3/Perseverance
- 1/Escargot, 2/Curiosity, et 3/Perseverance

Les élèves doivent rechercher sur Internet la vitesse des deux rovers, puis ils doivent les convertir dans une même unité afin de comparer leurs vitesses à celle d'un escargot. Simple et ludique, cette question est de niveau collège et elle peut servir d'accroche pour l'étude de

la propulsion d'un rover, d'une comparaison entre rovers... les possibilités sont larges. Suite à ce type de question introductive, les élèves sont confrontés à des questions demandant de réaliser des expériences et d'utiliser des outils numériques et/ou mathématiques.

Par exemple, la question proposée ci-dessous nécessite l'utilisation du logiciel en ligne Marsview (gratuit), spécialement créé par Philippe Cosentino, connu pour ses nombreux logiciels SVT - utilisés du collège aux ECE - et membre de la cellule éducation de Géoazur.



Capture d'écran du logiciel 'Marsview'

En utilisant ce logiciel, notez le retard d'arrivée des ondes S par rapport aux ondes P ... et à l'aide de l'hodochrone, évaluez la distance qui sépare l'épicentre du 'marsquake' du capteur SEIS de InSight.

Pour le calcul de la distance épacentrale, deux valeurs sont à trouver car vous devrez utiliser successivement l'hodochrone du modèle EH45TcoldCrust1b et celui du modèle Gudkova.

La recherche de réponse initie un travail de découverte du logiciel Marsview. En classe, il peut être utilisé en SVT pour le collège dans la partie sismologie – cycle 4. En lycée, le logiciel est aussi utilisable pour un travail sur la notion de modèle en classe de 1^{ère}. Les données réelles ont en effet permis de modifier le modèle

initialement supposé de déplacement des ondes en profondeur (modèle EH45T).

Le logiciel donne accès à l'élève à deux modèles et au regard des données enregistrées par InSight, l'élève comprend l'évolution du modèle (modèle EH45T vers le modèle Gudkova). Celui-ci évoluera

sans doute encore avec les futures données.

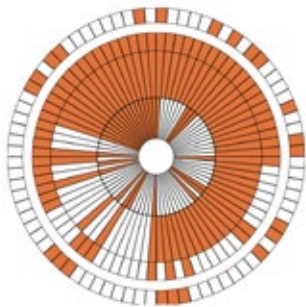
Dans ce troisième exemple, les élèves doivent décoder le message secret du parachute de Namazu en se basant sur le code utilisé par le JPL (Jet Propulsion Laboratory, le laboratoire de la NASA qui développe les missions d'exploration

du Système solaire). On pourrait croire qu'il s'agit du message « Dare Mighty Things », « Oser des choses grandioses » en français, la devise du JPL, message qui était codé sur le parachute de la mission Mars2020. Ce n'est pas le cas : le message a été codé suivant le même principe mais la réponse est « Namazu is fun ».

Afin de décoder le message, les élèves doivent en comprendre le principe, de préférence sans faire de recherche sur Internet car la réponse y est directement donnée. Le message est codé en binaire : le orange représente 1, le blanc représente 0. Le parachute est découpé en trois cercles partant du centre auquel s'ajoute un cercle extérieur. Chaque cercle est découpé en colonnes orange ou blanche. Il faut lire le message à partir de ces cercles sachant que chaque cercle est un mot dont les lettres sont encodées sur 10 bits. C'est ainsi que le cercle situé au centre du parachute encode les lettres N, A, M, A, Z, U qui forment le mot Namazu.

Voilà un exercice ludique pour les programmes de SNT et des spécialités NSI et SI du lycée.

Q2. A l'aide de ces ressources Internet, découvrez le message codé de Namazu ci-dessous :



Retour des établissements participants.

Ces défis deviennent une routine pour bon nombre d'élèves à travers la France et le monde via le réseau des établissements français de l'étranger (Chine, Australie, Espagne, Irlande, Allemagne, Roumanie...) Les défis étant en français ou en anglais, ils attirent aussi des classes de non francophones et pourquoi pas un jour des classes DNL.

Les retours des établissements sont toujours très pertinents et l'existence de niveaux « junior » et « expert » au sein des défis laissent aux collégiens et aux lycéens un cadre dans lequel s'exprimer techniquement. Voici quelques retours issus de questions posées cette année :

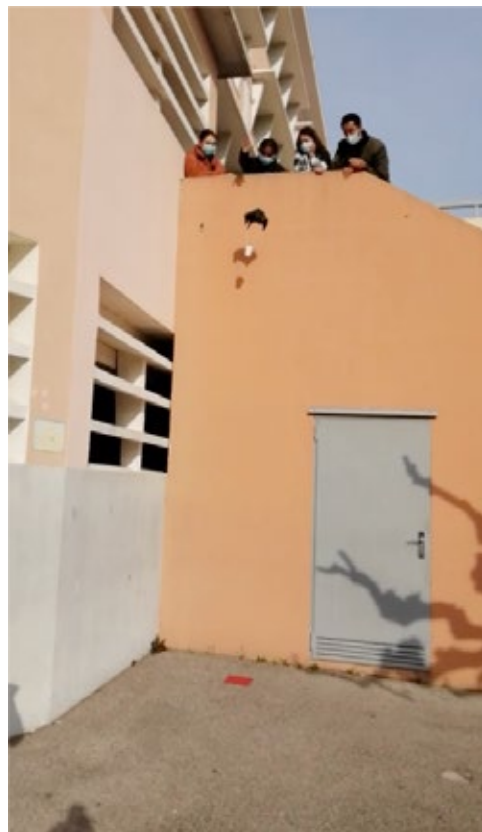


Réalisation d'une maquette du Système solaire
Lycée français de Dublin, Défi #2, année 2020-2021.

Le lâché d'œuf du défi #3 est un classique du défi Namazu et il est revenu pour célébrer les atterrissages de différentes missions.

Comment faire en sorte qu'un œuf soit lâché d'un étage et qu'il ne se casse pas ?

Les collégiens pourront travailler en technologie sur la réalisation d'un dispositif, en physique sur des calculs d'énergie.

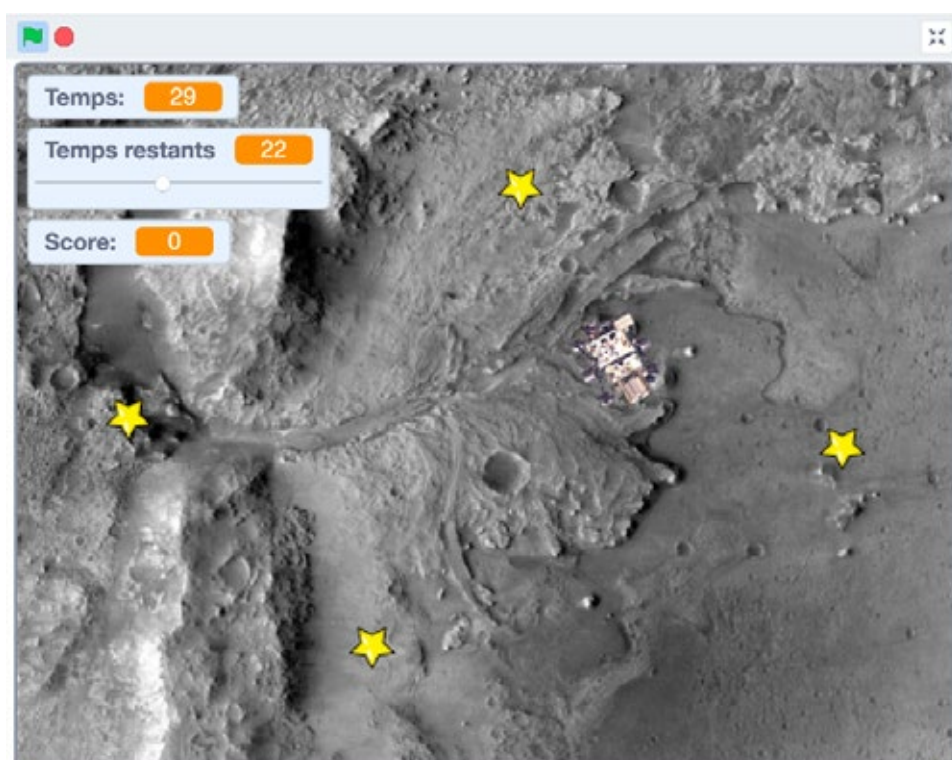


Lâché d'un œuf pour modéliser l'atterrissage
de Perseverance.

Collège de Beausoleil, Défi #3, année 2020-2021.



Réalisation de Perseverance
via Minecraft.
Lycée français de Shanghai.
Défi #3, année 2020-2021.



Réalisation d'un jeu via Scratch.
Collège Roy d'Espagne de Marseille.
Défi #2, année 2020-2021.

En utilisant des logiciels préconisés en technologie et en mathématiques dès le collège, les élèves ont eu les défis de réaliser un programme Scratch ou de construire Perseverance via Minecraft. Encore une fois l'activité peut être prise telle quelle pour un cours par les enseignants et les élèves profitent de l'environnement des missions martiennes qui les motive. À la fin de chaque défi, un classement est réalisé après la correction des

retours, et l'excitation est à son maximum. L'esprit de réseau est également présent via certaines questions où des établissements doivent communiquer entre eux. Enfin, un lien direct avec les *sciences teams* des missions est gardé malgré les plannings des chercheurs et chaque année, les élèves inscrits ont des questions au cours desquelles ils doivent échanger avec les scientifiques.

En conclusion, si l'aventure Namazu vous intéresse, vous pouvez retrouver les défis à l'adresse suivante : <https://mars2020.oca.eu/fr/mars2020-namazu-contest>
Le défi #4 est en cours.
Afin d'inscrire votre établissement, vous pouvez nous contacter à namazu@geoazur.unice.fr

KEPLER CONFINÉ

Myriam Bergon, professeure de physique au Lycée Rosa Parks, Montgeron
Myriam-Karine.Bergon@ac-versailles.fr

Jean Guérard, membre de la SAF, dirige l'observatoire Camille Flammarion à Juvisy-sur-Orge
jean.guerard@saf-astronomie.fr

Une expérience pour explorer la première loi de Kepler par l'observation de la Lune et la mesure de son diamètre apparent, révélant son orbite elliptique autour de la Terre. Des élèves de Terminale S ont réalisé une série de clichés et traité les images sur ordinateur. La précision des mesures atteint 0,1 % sur le diamètre apparent, ce qui permet de restituer fidèlement l'excentricité connue de l'orbite. Ce projet a gardé la motivation des élèves grâce à une activité concrète et des séances hebdomadaires en visio.

Introduction

Johannes Kepler (1571 – 1630), a établi ses lois sur le mouvement des corps célestes par l'analyse des abondantes et minutieuses observations collectées par son prédécesseur, l'astronome danois Tycho Brahe (1546 - 1601). Kepler énonce ainsi une nouvelle propriété en 1609 :

Les planètes décrivent des orbites en forme d'ellipses dont le Soleil occupe un des foyers.



C'est une idée révolutionnaire pour l'époque ! Elle rompt avec le dogme des orbites circulaires et explique avec une meilleure précision les écarts aux cercles que Ptolémée s'appliquait à modéliser dans son Almageste, combinant péniblement déférents et épicycles.

Cette loi est aussi valable pour le couple Terre-Lune. En parcourant une ellipse dont l'un des foyers est la Terre, sa distance doit donc varier. Mais de combien ? Est-ce perceptible ? Une mesure est-elle réalisable ? Avec quel matériel ?

Tel est le point de départ de la campagne de mesure effectuée au printemps 2020 par des élèves de Terminale

du Lycée Rosa Parks à Montgeron dans l'Essonne.

Bien sûr, on connaît aujourd'hui l'orbite de la Lune bien plus précisément qu'à l'époque de Kepler et on sait depuis Newton que les lois de Kepler ne sont que les conséquences d'une loi plus fondamentale : celle de la gravitation universelle. La mesure n'apportera pas de connaissance astronomique supplémentaire, mais la Lune, qui boucle son tour de Terre en un petit mois, avec une excentricité notable de 5%, offre l'occasion aux élèves de s'attaquer à la mécanique céleste et d'obtenir un résultat convaincant dans un temps compatible avec leur scolarité.

De plus, les lois de Kepler sont toujours au programme du nouveau bac de Spécialité en Physique Chimie qui fait une focale également sur la lunette astronomique de Galilée.

Diamètre apparent

La variation de distance de la Terre à la Lune, du fait de cette orbite elliptique, se traduit par une variation de son diamètre apparent, qui doit être mesurable. Le diamètre apparent s'exprime comme un angle : celui sous lequel l'observateur voit l'objet. Il s'agit donc de mesurer jour après jour le diamètre apparent de la Lune, et de le tracer en fonction du temps pour révéler cette variation.

Mais la Lune n'est pas si grosse que ça : pour un diamètre réel de 3 500 km, vu à 384 000 km, elle occupe un angle de $0,52^\circ$, soit 31 minutes d'arc. Prise directement par un smartphone ou un petit appareil photo, l'image rendra un objet de quelques dizaines de pixels seulement (figure 1a), et certainement surexposé, dont il sera difficile d'extraire le diamètre avec précision.

Toutefois, un bon appareil photo muni d'un objectif, ou un véritable instrument astronomique (lunette ou télescope), fourniront une image exploitable en centaines de pixels (figure 1b, 1c, ci-après).



Fig.1a. Lune prise directement par un smartphone (non exploitable).



Fig.1b. Lune prise par un smartphone derrière l'oculaire d'une lunette astronomique 80/1200, exploitable.



Fig.1c. Lune prise par un appareil numérique au téléobjectif 600 mm (équivalent).

Campagne de prises de vue

C'est ainsi que plusieurs séries d'images de la Lune ont été prises par différents appareils personnels durant les belles soirées et matinées du printemps 2020. Nous présentons ici le dépouillement d'une série particulièrement fournie, presque quotidienne, réalisée à l'aide d'un simple appareil photo, un bridge disposant d'un zoom numérique. Il est en effet plus pratique d'alimenter la banque d'images avec le même appareil, réglé sur les mêmes conditions de prise de vue à chaque fois pour ne traiter qu'une seule conversion d'échelle sur tout le lot. Sinon, chaque appareil doit être étalonné pour garantir une banque homogène.

Durant les nouvelles Lunes (autour du 23 avril et du 22 mai 2020) les photos n'ont pas pu être réalisées en raison de la finesse du croissant et de la proximité de la Lune avec le Soleil, ce qui la rendait invisible. D'autre part, certaines dates sont manquantes en raison du mauvais temps.

Un programme de traitement d'image écrit en langage Python nous a permis d'extraire le diamètre apparent (voir encadré). Le programme est capable de réaliser cette mesure quelle que soit la phase de la Lune : croissant, pleine ou gibbeuse. C'est en fait le contour net, sur le fond du ciel, qui est exploité, et qui n'occupe jamais que la moitié du disque lunaire. En effet, même sur une Lune gibbeuse presque pleine, comme sur la figure 2a, le terminateur qui marque la limite de l'ombre ne doit pas être compté dans le contour.

Cependant, dans un compromis d'efficacité et de simplicité de programmation, l'algorithme n'est pas totalement automatique et une opération manuelle de placement des points de contour est requise avant le calcul du diamètre. Mais cette étape est ergonomique grâce à l'utilisation de la souris et du "zoom molette".

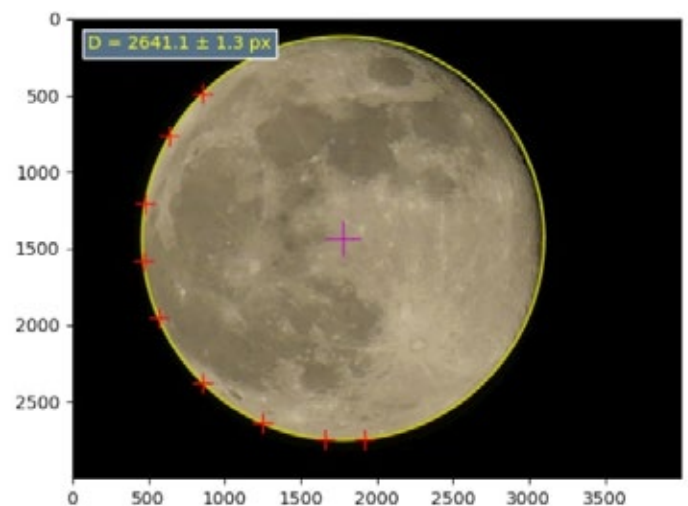


Fig.2a. Lune du 08/04/2020 ; diamètre apparent : 2641,1 pixels.

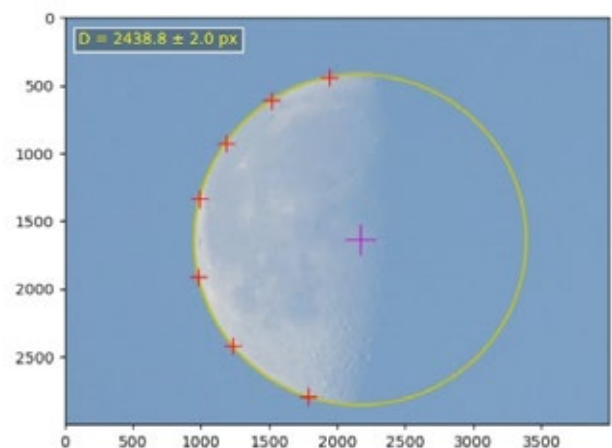


Fig.2b. Lune du 14/04/2020 ; diamètre apparent : 2438,8 pixels.

Les points expérimentaux (les diamètres) sont alors reportés sur une courbe en fonction du temps. La conversion en minutes d'arc est obtenue par un étalonnage de l'appareil en prenant par exemple la photo d'un objet représentatif à une distance dûment mesurée (35 cm vus à 38 m pour être à l'échelle). L'amas des Pléiades est aussi un bon étalon astronomique.

Comme à notre époque moderne les éphémérides lunaires sont bien connues (la distance Terre-Lune est mesurée aujourd'hui au centimètre près par des tirs laser), le diamètre apparent théorique obtenu par exemple par le logiciel Stellarium est discrètement superposé aux mesures pour en apprécier la précision.

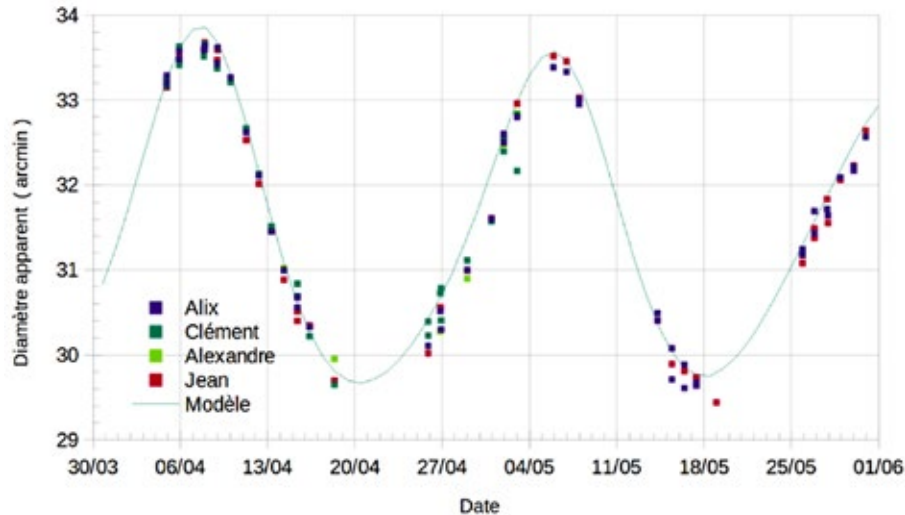


Fig.3. Résultats des observations.

Discussion

Ainsi un diamètre apparent plus grand correspond à une Lune plus proche (au périégée), alors qu'un diamètre apparent plus petit correspond à une Lune plus éloignée (à l'apogée). On observe donc une variation périodique de la distance Terre-Lune, révélatrice de son orbite elliptique. L'amplitude de ces variations est de 12 % de la distance Terre-Lune moyenne ; on a bien affaire à une excentricité notable, plutôt grande par rapport aux planètes du Système solaire. On en déduit le rapport entre apogée et périégée (relevés sur la figure) :

$$r = \frac{\text{Apogée}}{\text{Périégée}} = \frac{33,7}{29,6} = 1,1385 \pm 0,0036$$

Le passage de la Lune au périégée a eu lieu en même temps que la Pleine Lune (à un jour près) ; nous étions justement dans les conditions d'une "Super Lune".

L'incertitude est l'écart-type des mesures. L'excentricité de l'orbite est alors donnée par la propriété des coniques :

$$e = \frac{r-1}{r+1} = 0,0648 \pm 0,0016$$

La valeur précise de l'excentricité pour le mois d'avril 2020 est de 0,0658 (prévision Stellarium). La présente mesure est donc en accord avec les paramètres de l'orbite lunaire aujourd'hui bien connus, et constitue une vérification de la première Loi de Kepler, avec une précision intéressante par rapport à d'autres publications sur le sujet [2].

On note que la précision sur r est de 0,3 %, alors qu'elle n'est plus que de 2 % sur e , d'où la nécessité de faire des mesures assez précises. La validation des résultats par le calcul d'incertitudes est une compétence essentielle de physique chimie à travailler pour les élèves.

Remarque : les mesures de diamètre ne démontrent pas complètement l'ellipse. Pour cela, il faudrait disposer de mesures d'ascension droite, par exemple le passage au méridien tous les jours. On tracerait alors l'orbite en coordonnées polaires avec cet angle et la distance. Mais le problème est effectivement difficile. Par exemple le relevé d'ascension droite est pris à la surface de la Terre, et non au centre ; la Lune n'étant qu'à 60 rayons terrestres, ce n'est pas négligeable. Et au final, il sera encore difficile de discerner une ellipse d'un simple cercle décentré avec le point équant comme l'ont proposé les modèles géocentriques. Ce type de géométrie paraît difficilement accessible, même en Terminale.

Conclusion

La variation du diamètre apparent, inversement proportionnelle à la variation de la distance Terre-Lune, est donc accessible avec des moyens courants : un appareil photo avec un téléobjectif moyen (focale effective de 108 mm, combiné au zoom numérique pour donner une focale équivalente sur un appareil 24/36 de 600 mm), mais aussi un smartphone à l'oculaire d'une lunette astronomique.

Le programme en langage Python est assez simple et extrait le diamètre au pixel près ; son exécution a été vérifiée sur les distributions principales du langage : Anaconda et EduPython.

Cette étude a été réalisée par les élèves de l'atelier d'astronomie de la Terminale S T14 du lycée Rosa Parks à Montgeron dans l'Essonne, en classe virtuelle.

Élèves : Alix Bottione, Clément Friedberger, Valentin Gibert, Alexandre Pinheiro, aujourd'hui bacheliers.

Références

[1] déférents et épicycles :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89picycle>.

[2] Cahier pédagogique "Astro à l'École" de l'opération "Sciences à l'École", 2017.

[3] I.D. Coope, Circle fitting by linear and non linear least squares, Journal of Optimization Theory and Applications, 1993.

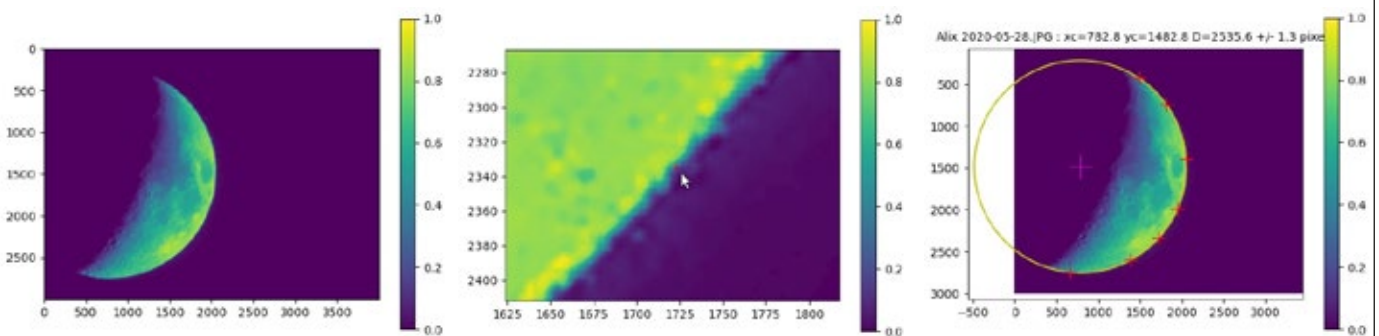
Identification d'un cercle

La Lune est un objet sphérique, comme tous les corps de plus de 1 000 km de diamètre, dominés par la gravité. La différence entre rayon polaire et rayon équatorial n'est que d'un millièmètre, ce qui est plus petit que la précision photographique recherchée.

Le problème est donc relativement bien conditionné : à partir d'un lot de points du contour circulaire fournis (couples de coordonnées x, y), un algorithme doit être capable d'extraire le diamètre du cercle sur ce contour même incomplet, comme un croissant fin, un quartier, ou une lune gibbeuse. Dans ce dernier cas, même proche de la pleine Lune, le contour utile ne fait que la moitié du cercle, l'autre moitié s'appuyant sur le terminateur (la limite de l'ombre) et non sur le vrai contour.

Le programme consiste donc dans un premier temps à sélectionner manuellement des points du contour par une interaction ergonomique à la souris : zoom molette pour repérer le contour au pixel près, clic gauche pour ajouter un point, clic droit pour le retirer en cas d'erreur, RETURN pour terminer et calculer le cercle. On ajoute autant de points que désiré, répartis sur le contour utile, une petite dizaine étant suffisante.

Théoriquement, 3 points suffisent pour résoudre un cercle, mais l'algorithme de Coope à l'œuvre dans le programme résout le cercle par moindres carrés [3]. Le détail du calcul de la régression circulaire est expliqué dans l'article.

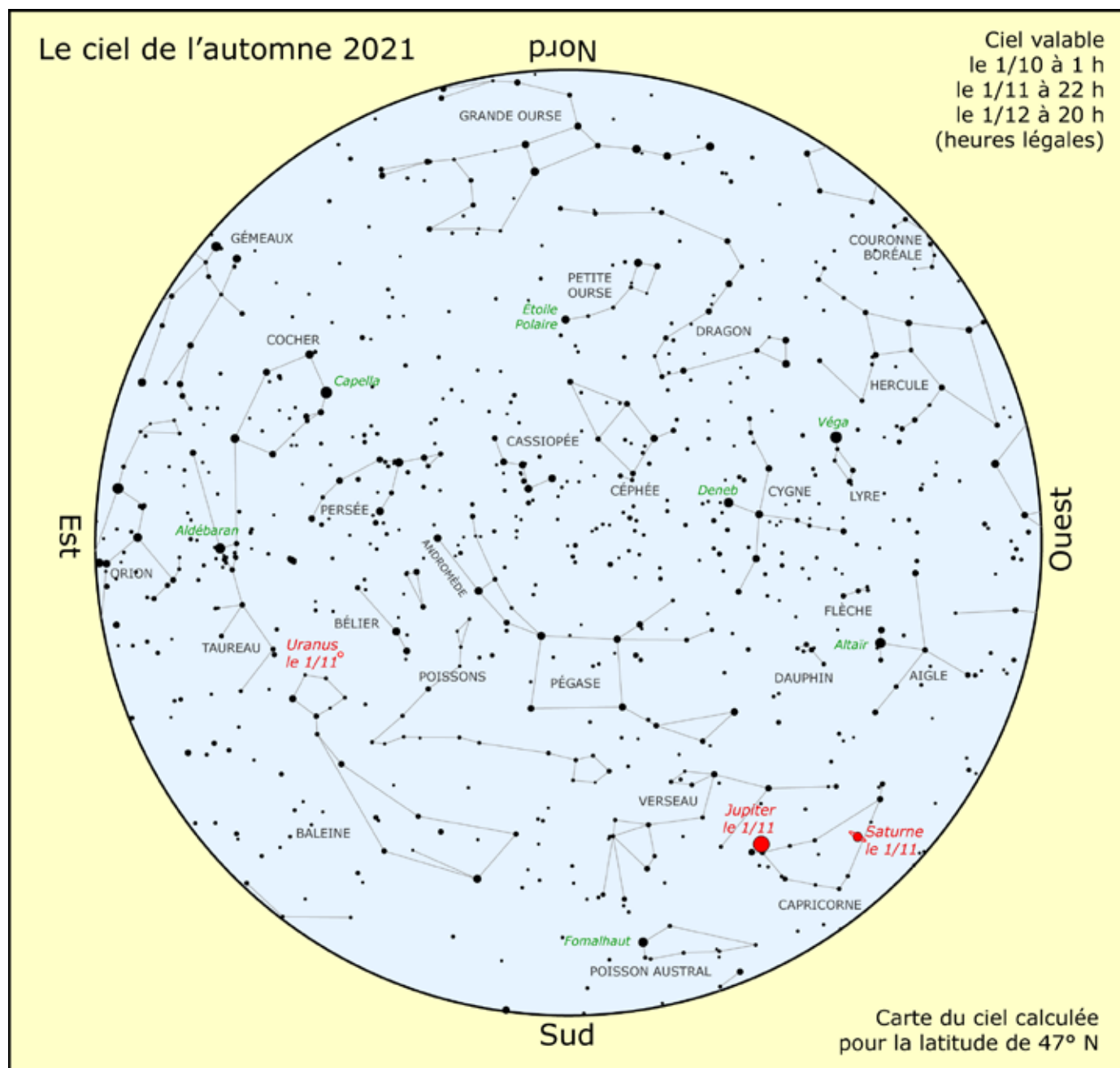


De gauche à droite : image originale contrastée en fausses couleurs; zoom molette et positionnement d'un point (clic gauche); cercle restitué après positionnement de plusieurs points de contour, ici 7.

Le programme est disponible à l'adresse suivante : <https://github.com/jeanguerard/MoonCircle>

Il a été testé sur les principales distributions Python : Anaconda et EduPython. Volontairement simplifié, il tient en un seul code source, et n'utilise que quelques modules standards.

Différentes options sont possibles pour l'améliorer dans le sens de l'automatisation, avec plus d'intelligence pour la localisation automatique de la Lune sur l'image, mais l'algorithme butera sur un point dur : faire la différence entre contour utile et terminateur (limite de l'ombre). Nous avons jugé comme bon compromis le positionnement manuel des points de contour à la souris.



Visibilité des planètes

On peut facilement trouver Mercure le matin fin octobre avant le lever du Soleil (élongation maximale le 25).

Vénus est visible le soir pendant tout l'automne (élongation maximale le 29/10) mais elle reste basse au-dessus de l'horizon sud-ouest.

Mars passe derrière le Soleil début octobre, elle est donc invisible cet automne.

Jupiter et **Saturne** étaient à l'opposition en août, les deux planètes géantes sont toujours observables le soir jusqu'à la fin de l'année.

Uranus passe à l'opposition le 4 novembre. C'est l'occasion de la rechercher dans le Bélier (mag 5,8).

Il faudra surveiller cet automne la comète Leonard.

Quelques événements (heures légales)

22/09 : équinoxe d'automne à 21 h 21.

8/10 : maximum des Draconides (étoiles filantes).

9/10 : rapprochement Vénus croissant de Lune.

15/11 : maximum des Léonides (mais Lune gibbeuse).

19/11 : éclipse partielle de Lune (l'entrée dans l'ombre est tout juste visible le matin au coucher de la Lune depuis une partie de la Bretagne et du Calvados).

4/12 : éclipse centrale de Soleil (totale en Antarctique).

13-14/12 : Géminides (étoiles filantes).

21/12 : solstice d'hiver à 16 h 59.

Lune

Pleine Lune : les 21/09, 20/10, 19/11/21, 19/12/21.

Nouvelle Lune : les 6/10/21, 4/11/21, 4/12/21.

VISIBILITÉ DE MERCURE ET DE VÉNUS À L'AUTOMNE 2021

Mercure est bien visible fin octobre, à 18° du Soleil alors que Vénus, située pourtant à 47° du Soleil, sera plus difficile à observer que d'habitude. Comment l'expliquer ? Quatre paramètres sont à prendre en compte.

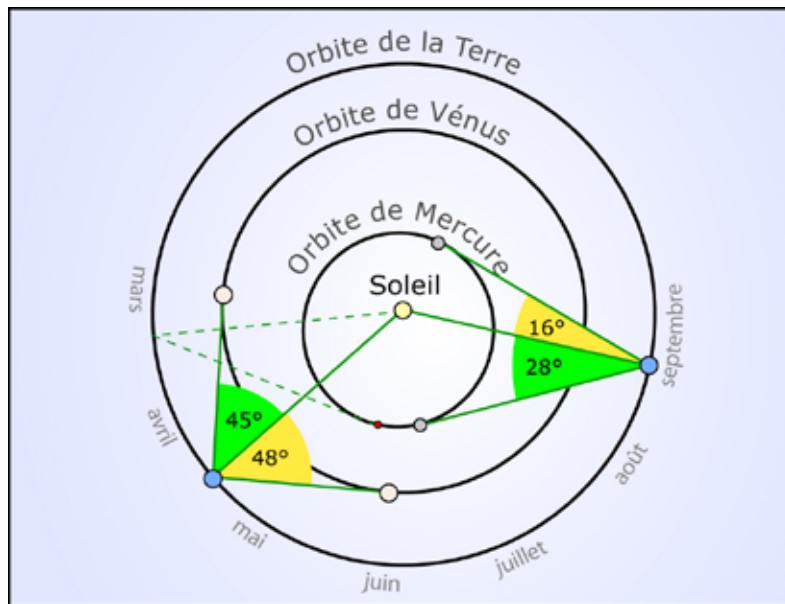


Fig.1. Élongations maximales de Mercure et de Vénus. On a noté en jaune les élongations Ouest (la planète est vue ici à droite du Soleil) et en vert les élongations Est (la planète est vue à gauche du Soleil). Les mois correspondent à la position de la Terre. Le point rouge indique l'aphélie de Mercure (quand elle est au plus loin du Soleil).

1. L'élongation

Pour qu'une planète intérieure comme Mercure ou Vénus soit bien visible, il faut tout d'abord qu'elle soit angulairement la plus éloignée possible du Soleil, on parle alors d'élongation maximale (figure 1). L'élongation maximale de Mercure varie entre 16 et 28° , à cause de la grande excentricité de son orbite. Pour Vénus, qui a une orbite presque circulaire, l'élongation maximale ne varie qu'entre 45 et 48° .

On peut vérifier sur la figure 1 qu'une élongation Est de Mercure sera plus importante si elle a lieu en août ou septembre puisque qu'elle correspond à la plus grande distance Soleil-Mercure. De même, une élongation Ouest de Mercure sera plus importante si elle a lieu en mars ou avril (pointillés).

Soir ou matin ?

Si une planète intérieure, Mercure ou Vénus, est en élongation Est (donc à gauche du Soleil pour un observateur européen), elle sera visible le soir (figure 2).



Fig.2. Vénus le soir, au coucher du Soleil, fin octobre 2021.

Si elle est en élongation Ouest (à droite du Soleil), elle sera visible le matin (figure 3).



Fig.3. Mercure le matin, au lever du Soleil, fin octobre 2021.

2. L'inclinaison de l'écliptique

L'élongation n'est pas le seul paramètre qui joue sur la visibilité d'une planète interne comme on peut le voir sur les figures 2 et 3 : l'inclinaison de l'écliptique sur l'horizon est aussi très importante. Le matin au lever du Soleil, c'est aux alentours de l'équinoxe de septembre que l'écliptique fait l'angle maximal avec l'horizon dans l'hémisphère nord (figure 4). La planète sera alors plus haut au-dessus de l'horizon et plus longtemps observable.

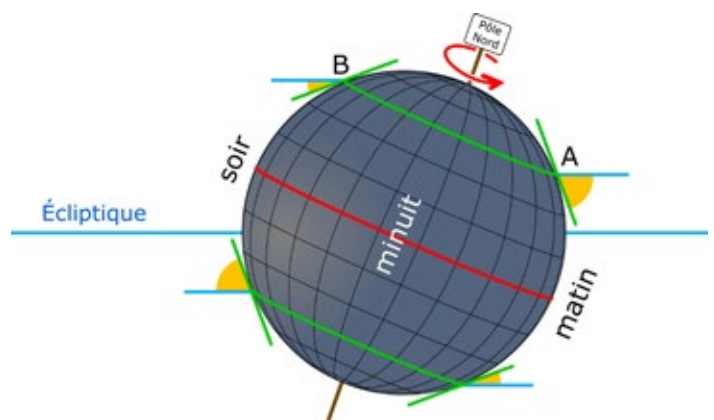


Fig.4. La Terre à l'équinoxe de septembre. Le Soleil est situé derrière la Terre. On a représenté quatre horizons en vert aux latitudes 45° N et 45° S, aux levers et couchers du Soleil. Si, depuis l'hémisphère nord le matin (point A), on regarde en direction du Soleil, l'angle que fait l'écliptique (en bleu) avec l'horizon (en vert) mesure environ 68° . Par contre, le soir (point B), cet angle ne mesure plus que 22° . C'est l'inverse dans l'hémisphère sud.

Le soir au coucher du Soleil, cet angle est maximal autour de l'équinoxe de mars. C'est l'inverse dans l'hémisphère sud.

3. La latitude écliptique

C'est le troisième paramètre. Fin octobre 2021, Vénus est au sud de l'écliptique, ce qui diminue encore sa hauteur au-dessus de l'horizon (latitude écliptique négative, voir la figure 2). Par contre, Mercure est au nord de l'écliptique (latitude positive, voir la figure 3).

4. La magnitude

L'éclat de Vénus varie très peu, de $-3,9$ à $-4,7$. Cela peut paraître contradictoire car sa distance à la Terre varie de 1 à 6 ! Mais au fur et à mesure que Vénus s'approche de la Terre, sa phase diminue, ce qui compense en partie la diminution de distance... La magnitude de Mercure varie beaucoup plus. Pour l'une comme pour l'autre, l'éclat maximal est atteint entre l'élongation maximale et la conjonction inférieure (le passage entre le Soleil et la Terre).

Meilleures périodes de visibilité de Vénus

Pour que Vénus soit à son maximum de visibilité, il faut donc :

1. qu'elle soit proche de l'élongation maximale ;
2. que l'on soit aux alentours de l'équinoxe de mars le soir (élongation E) ou de septembre le matin (élongation O), pour que l'inclinaison de l'écliptique sur l'horizon soit maximale ;
3. que la planète soit au nord de l'écliptique ;
4. que l'éclat soit maximal, ce qui se produit un bon mois après l'élongation maximale le soir, ou un bon mois avant le matin.

Date	Élongation E ou O	Matin (M) ou Soir (S)	Latitude écliptique	Hauteur h
29/10/2021	47,0° E	S	-3,7°	12°
20/03/2022	46,6° O	M	+2°	16°
04/06/2023	45,4° E	S	+2,5°	31°
23/10/2023	46,4° O	M	-0,2°	39°

(...)

22/03/2028	46,1° E	S	+3°	42°
------------	---------	---	-----	-----

Quelques élongations maximales de Vénus. La hauteur h indique la hauteur de Vénus au-dessus de l'horizon au moment du coucher du Soleil le soir ou de son lever le matin pour une personne habitant à 47° de latitude nord.

Si on observe le tableau qui suit, on s'aperçoit que l'élongation maximale du 29 octobre est particulièrement peu propice à l'observation, avec une hauteur au-dessus de l'horizon de 12° seulement au coucher du Soleil. La prochaine configuration vraiment intéressante le soir aura lieu en mars - avril 2028 où toutes les conditions seront réunies. Le 22 mars au coucher du Soleil, pour une personne habitant à 47° de latitude nord, Vénus sera située à 42° au-dessus de l'horizon. Au début du crépuscule astronomique, quand le ciel sera parfaitement noir, elle sera encore à plus de 24° de hauteur. Pour le matin, l'élongation d'octobre 2023 sera aussi intéressante.

Meilleures périodes de visibilité de Mercure

Les conditions de visibilité de Mercure sont les mêmes que celles énoncées pour Vénus au paragraphe précédent avec cependant une 5^e condition importante : l'élongation maximale variant énormément, entre 16 et 28°, elle doit

avoir lieu aux alentours de mars-avril pour une élongation O, d'août-septembre pour une élongation E.

Malheureusement, cette condition est incompatible avec la 2^e condition (équinoxe de mars pour une élongation E ou de septembre pour une élongation O) ! Nous ne verrons donc jamais Mercure dans des conditions optimales, du moins dans l'hémisphère nord.

Sur le tableau qui suit, voici les quelques configurations intéressantes :

En planète du soir, Mercure est à plus de 15° de hauteur les 29/04/22 et 11/04/23. Dans les deux cas, l'élongation n'est pas énorme (20°) mais c'est la période où l'inclinaison de l'écliptique est optimale.

En planète du matin, on notera les 25/10/21, 8/10/22 et 22/09/23 avec une élongation de 18° seulement mais la condition 2 également remplie.

Date	Élongation E ou O	Matin (M) ou Soir (S)	Latitude écliptique	Hauteur h
25/10/2021	18.4° O	M	+2°	17°
07/01/2022	19.2° E	S	-0,9°	12°
16/02/2022	26.3° O	M	0,3°	9°
29/04/2022	20.6° E	S	2,7°	18°
16/06/2022	23.2° O	M	-3,5°	11°
27/08/2022	27.3° E	S	-2,2°	7°
08/10/2022	18.0° O	M	1,4°	16°
21/12/2022	20.1° E	S	-1,6°	10°
30/01/2023	25.0° O	M	0,9°	11°
11/04/2023	19.5° E	S	2,7°	18°
29/05/2023	24.9° O	M	-3,5°	8°
10/08/2023	27.4° E	S	-1,8°	8°
22/09/2023	17.9° O	M	0,8°	16°
04/12/2023	21.3° E	S	-2,2°	8°

Élongations maximales de Mercure.

Dans l'hémisphère sud

Les conditions de visibilité de Mercure sont meilleures. En effet, l'angle que fait l'écliptique avec l'horizon ouest le soir est maximal à l'équinoxe de septembre. C'est justement en août - septembre que l'élongation Est de Mercure est la plus importante.

Le 27 août 2022 par exemple, à la Réunion, Mercure sera à plus de 26° au-dessus de l'horizon à l'heure du coucher du Soleil.

Pour les meilleures observations du matin, il faut chercher des élongations maximales proche de mars-avril, comme celle du 16 février 2022. Ce jour-là à la Réunion, l'angle h vaudra près de 26°.

GRANDE CONJONCTION ET ESPRIT CRITIQUE

Olivier Gayrard

L'auteur exploite la grande conjonction entre Jupiter et Saturne du 18 décembre 2020 pour transmettre une des compétences spécifiques mentionnée au BO : « Aider les élèves à développer leur esprit critique, à distinguer les savoirs des opinions ou des croyances, à savoir argumenter et à respecter la pensée des autres ».

Introduction

La liste des compétences communes à tous les professeurs et personnels d'éducation figure dans le référentiel des compétences professionnelles des métiers du professorat et de l'éducation (1). On peut y lire en tête la phrase suivante, « aider les élèves à développer leur esprit critique, à distinguer les savoirs des opinions ou des croyances, à savoir argumenter et à respecter la pensée des autres ».

J'ai personnellement fait le constat que dans l'exercice de mon métier cette compétence était insuffisamment travaillée pour elle-

même. L'article suivant détaille l'activité que j'ai mis en place pour pallier ce manque ainsi qu'une brève réflexion personnelle sur les résultats des élèves.

Le contexte est celui de la grande conjonction Jupiter Saturne du 21 décembre 2020 à travers deux extraits de journaux, l'un traitant l'information sous l'angle de l'astrologie, l'autre de l'astronomie.

Les conditions de passation

L'activité a été testée sur un groupe de 28 élèves de classe de seconde générale sur la base du volontariat.

Tous ont fait tout ou partie de ce travail en environ une heure. Ce groupe est d'un niveau scolaire satisfaisant, bien que quelques élèves soient en difficulté. Un tiers de cette classe a demandé pour l'année de première des spécialités scientifiques.

L'activité, dénommée par la suite ILS, (Inquiry Learning Spaces), s'est déroulée individuellement à la maison. Les élèves ont dû pour cela se connecter à l'environnement Graasp (2). Cet écosystème permet non seulement de créer des espaces interactifs d'apprentissage, mais aussi de recueillir les traces de ces apprentissages.



*Fig.1. Le 11-11-2020. Canon EOS 60 Da, f = 55 mm, ISO 800, 10 secondes.
Le petit quadrilatère indiqué est formé par les étoiles Terebellum I, II, III et IV du Sagittaire.*



Fig.2. Le 21-11-2020, dans les mêmes conditions de prise de vue. Le format vignette contrairement au plein écran ne permettant pas la comparaison, un astérisme a été pour l'occasion dessiné. Il n'apparaît pas dans l'ILS.

De nombreux simulateurs peuvent y être intégrés, ce qui est une véritable force pour la pratique des sciences. L'un des intérêts du projet est lié au partage de ressources entre enseignants.

Si un ILS publié ou partagé intéresse un enseignant, il peut le copier/coller dans son espace personnel, le modifier et travailler ensuite avec ses élèves.

Résumé de l'activité

Cet ILS (3) se découpe en six parties. Au cours de la première, « La voûte céleste », un personnage fictif, Stella, est présentée prenant en photo le ciel étoilé en début de nuit du 11 novembre 2020. Pour permettre aux élèves n'ayant pas un APN d'expérimenter à leur tour, un tutoriel permettant de choisir manuellement les différentes fonctions de leur smartphone y est présenté. Suivent les deux photographies, (figures 1 et 2) en plein écran.

Les élèves sont invités en comparant ces deux photos prises dans les mêmes conditions à écrire ce qui

selon eux intrigue Stella.

Une aide est accessible pour leur permettre de passer à la phase deux. Elle interroge sur les positions respectives des points lumineux. Au cours de cette seconde phase les élèves sont sollicités quant à la rédaction d'un questionnaire. Là encore une aide est proposée, ils s'en saisissent ou non. Il s'agit d'un « drag and drop » avec les mots clef suivants : proche, percuter, unique objet et même direction.

La troisième phase « Esprit critique es-tu là ? » rentre dans le vif de l'objectif initial. De retour au chaud chez elle, Stella ouvre l'écran de son ordinateur portable et tape les mots clés suivant : « deux points lumineux dans le ciel ». Elle soumet sa requête à son moteur de recherche, puis prend le premier lien qui lui est proposé. Il est alors demandé aux élèves de lire à leur tour cet article d'un « dossiers astro » du Cosmopolitan « Découvrez les pires dates en 2020 selon l'astrologie » par Ludivine Olives, dont voici un extrait (4).

Le 21 décembre 2020 en astrologie

À cette date aura lieu ce qu'on appelle « la grande conjonction » qui arrive, environ, tous les 20 ans seulement. Jupiter et Saturne sont au plus près l'un de l'autre, et fonctionnent normalement ensemble. Or, Saturne (qui freine, empêche) ne peut pas aller de paire avec Jupiter (qui amplifie, épanouie) par nature. Résultat : nous allons connaître des frustrations, ne plus être sûrs de rien ce qui créera des tensions en nous-mêmes, mais aussi avec les autres. Chouette !

Alors on note ces dates dans notre calendrier pour mieux vivre ces périodes difficiles !

Les élèves sont invités à prendre le temps de noter leurs premières impressions. Puis, pour vérifier le niveau d'appropriation des informations de la ressource fournie, ils doivent répondre à un quiz avant d'évaluer la fiabilité du document. Un indice de confiance, pouvant être déplacé entre 0 et 100 permet enfin

de relever le degré de confiance relatif aux informations données par cette ressource.

Dans la quatrième partie « Modélisation », les élèves doivent manipuler deux simulateurs d'astronomie. Stella n'est qu'en partie satisfaite par ce premier travail de recherche. Elle pense maintenant que « ces deux points lumineux » ne sont pas des étoiles mais des planètes. Qui plus est, ce serait les deux plus grosses planètes du Système solaire, Jupiter et Saturne. Globalement, elle n'a que peu confiance dans cet article car les résultats expérimentaux de l'astrologie sont calamiteux.

Quelle causalité pourrait-il exister entre cette conjonction et les « tensions en nous-mêmes » ? Qui ne connaîtrait pas « de frustrations » dans cette période de COVID ? Ce profil ressemble trop à celui de la vie quotidienne de monsieur tout le monde. Ce n'est pas une preuve.

Elle se tourne alors vers le logiciel libre en ligne de planétarium Stellarium (5), affiche le ciel du

mercredi 11 novembre 2020 à 18 h 30. Puis elle avance la date jour après jour jusqu'au lundi 21 décembre 2020. Stella peu désormais nommer les objets qu'elle observe, Jupiter et Saturne.

Elle prend dès lors encore plus de plaisir à suivre cette grande conjonction. Chacune des images qu'elle prendra comportera des informations vérifiables et utilisables. Des preuves que la mécanique céleste est une théorie efficace, qui permet de prédire des événements. (figures 3 et 4).

Cependant comment expliquer ce rapprochement planétaire dans notre ciel ? Pour le découvrir, il faudra prendre en main l'application web Planets (6), choisir à nouveau la date du 11 novembre 2020 puis observez les positions relatives de la Terre, Jupiter et Saturne jusqu'à la date du 21 décembre 2020. À la souris il est possible de basculer le plan de l'écliptique pour vérifier l'alignement des trois astres, et mettre par exemple la Terre au premier plan, (figure 5).

Cinquième partie, « Conclusion ». D'aucuns diront que les photos de Stella sont esthétiques ou font rêver. Mais n'oublions pas le message scientifique qu'elles portent : la relativité de notre point de vue terrestre, les dimensions de notre Système solaire, la compréhension de notre position dans cette mécanique céleste. C'est probablement dans la compréhension de ce message que réside l'harmonie et la profondeur de ces photographies scientifiques. Nul besoin des illusions de l'astrologie pour en apprécier l'éclat. Pour conclure, les élèves ont à lire un extrait du journal Le Monde (7), rubrique science, astronomie, intitulé « grande conjonction entre les planètes Jupiter et Saturne visible dans le ciel ». À nouveau ils sont testés sur leur niveau d'appropriation au cours d'un quiz, puis ils évaluent la fiabilité cette nouvelle ressource ainsi que leur degré de confiance.

Dans la sixième et dernière partie, « Pour aller plus loin », un épisode de la chaîne You Tube Hygiène Mentale « L'Astrologie - Les mauvaises critiques » (8) est accessible pour ceux qui souhaitent approfondir leur



Fig.3. Le 18-12-2020. Canon EOS 60 Da, $f = 55$ mm, ISO 800, pose 10 secondes.



Fig.4. Copie d'écran de Stellarium au 18-12-2020.

réflexion, ainsi qu'un questionnaire réflexif sur cet ILS. Une moitié des élèves ont poursuivi ce dernier travail.

Quelques résultats d'élèves

À propos de la comparaison des deux premières photos, 60 % des élèves ont su relever que « Ce qui intrigue Stella c'est que les étoiles qu'elle sait immobiles bougent ». Les 40 % restant ont relevé la présence ou non des arbres, la luminosité du ciel, ou

encore le nombre d'étoiles visibles. La phase de questionnement s'est révélée très riche en proposition diverses, et moins d'un élève sur quatre a utilisé l'un des mots de la banque d'aide.

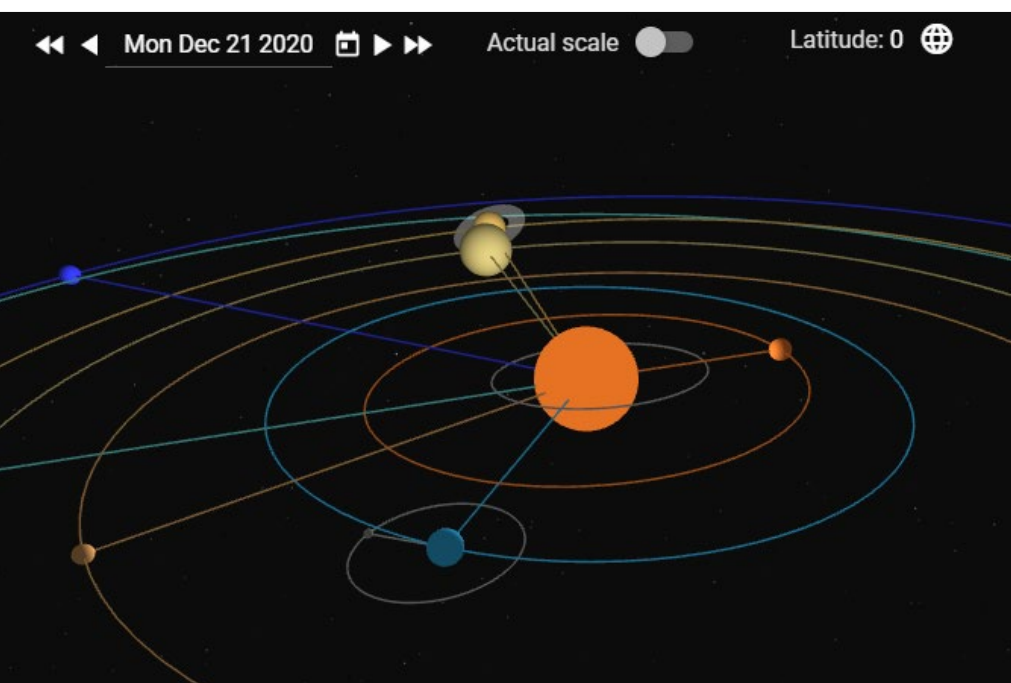
Cependant il est probable que tous aient pris connaissance de cette aide, toutes les questions portant désormais sur les positions des deux points les plus lumineux. Ont été proposés par exemple les questions suivantes : S'agit-il d'étoiles ?

Pourquoi les deux étoiles paraissent plus proches sur la deuxième photo ? Si les étoiles continuent à se reprocher indéfiniment vont-elles se toucher ? Dans combien de temps ? Suite à la lecture de l'article du Cosmopolitan, trois grands groupes équitables de premières impressions se sont dégagés. Voici pour les résumer quelques morceaux choisis. Ceux qui sont attirés et les croyants. « Je pense que la position des planètes et des astres a une influence dans nos vies » ou encore « J'aime beaucoup l'astrologie c'est quelque chose que je lis souvent et qui m'intéresse ».

Ceux n'ayant aucun intérêt ou faisant preuve d'esprit logique « Je trouve ça inutile il ne s'est absolument rien passé de différent à ces dates là l'année dernière », ou bien « Je trouve que les astrologues ont une imagination folle ! Chaque jour, il se passe des milliards d'événement sur Terre, alors il est très simple d'en faire le rapprochement avec la conjonction de deux planètes, tout en sachant que quoi qu'il arrive cet événement se produira ».

Et enfin ceux qui pourraient y croire ou lire ce type d'articles. « Je trouve

Fig.5. Copie d'écran de l'application Planets. Depuis la Terre, Jupiter et Saturne sont dans la même direction.



ce site assez bizarre mais peut-être que les informations sont vraies », « Je sais déjà que la source est un journal connu, j'ai déjà lu des articles de ce journal. L'article est intéressant et intrigant les couleurs sont vives et cela me donne envie de le lire. Cependant je ne suis pas une fervente de l'astrologie », « je ne suis pas quelqu'un qui croit en l'astrologie, mais je trouve ça intéressant, donc cet article vaut la peine d'être lu, et analysé ».

Avant de demander l'évaluation de cette ressource, il est nécessaire de vérifier si les élèves ont su trouver le passage traitant de la date du 21 décembre 2020, et comment il se sont appropriés cet extrait.

Quatre cinquièmes relèvent que la date du 21 décembre est bien citée dans la ressource comme étant un événement céleste rare, que le nom scientifique du phénomène céleste est le bon et que les deux « points lumineux » pris en photo par Stella sont en fait les planètes Jupiter et Saturne. Malgré le titre de l'article, (Découvrez les pires dates en 2020 selon l'astrologie), quatre élèves sur dix pensent que l'article traite clairement d'astronomie.

Les informations relevant des éphémérides ont été globalement relevées par les élèves, mais certains confondent l'astronomie et l'astrologie. Il est vrai qu'astronomes et astrologues partagent un vocabulaire commun. Ils ont cependant jugé la fiabilité de cette ressource faible et n'y font que peu confiance, (figure 6).

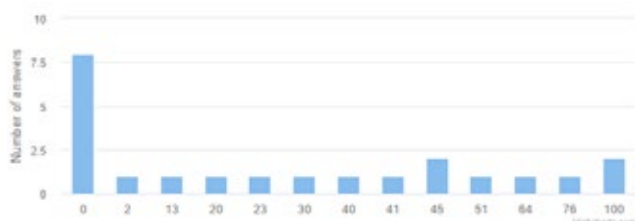


Fig.6. Résultat de l'indice de confiance. Il s'agit d'un curseur pouvant être déplacé entre 0 et 100 permettant de relever le degré de confiance relatif aux informations données par le Cosmopolitan.

Le quiz sur l'appropriation de l'article du Monde obtient le même score de quatre cinquièmes des élèves. Il fallait cette fois relever l'explication du phénomène céleste et si l'auteur travaille dans un laboratoire. Les élèves ont estimé cette nouvelle ressource fiable car il y a la

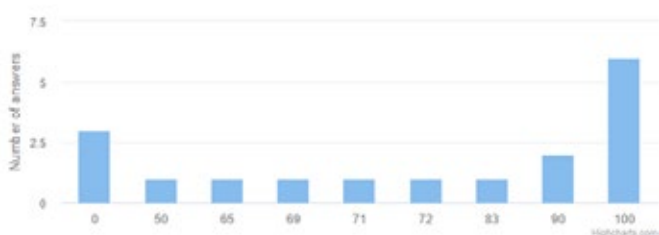


Fig.7. Résultat de l'indice de confiance relatif aux informations données par Le Monde.

présence d'un spécialiste et que ce vecteur d'information est reconnu. Leur indice de confiance va de 50% à 100%.

Conclusion

Un premier constat peut être fait sur l'appropriation des informations par les élèves. Cette compétence n'est pas suffisamment maîtrisée par un élève sur cinq et peut biaiser les réponses des prochaines questions. Les documents ici travaillés sont sur le web et la charge graphique est probablement un obstacle pour certains.

Par ailleurs les élèves ont essentiellement travaillé sur leur smartphone, avec la rapidité d'exécution qu'on leur connaît. Ces contenus étant sponsorisés, les publicités agissent comme des distracteurs. Nous sommes bien loin du document réalisé par le didacticien qui évite tous ces pièges. Toutefois c'est bien à travers le web que nos élèves s'informent en partie. En devenir maître et non pas récepteur passif est un enjeu. De tels ressources devront donc être à nouveau travaillées.

Plus positif, les élèves indiquent que ce travail leur a plu (score 0/0/5/7/1) et sont demandeurs de ce type d'activité, (figure 8). A été positivement jugée avec un score de 0/0/2/4/6 l'environnement Graasp où cet ILS a été produit.

Contrairement à mon habitude, je n'ai pas mis l'application de collaboration entre pairs via un chat dans cet ILS, application qui leur aurait permis d'échanger en petits groupes en distanciel. La passation de ce travail permettant le recueil les « learning analytics » (2096 mots en réponse aux quiz et textes libres) devait se faire en autonomie afin que leurs écrits soient les plus authentiques possibles.

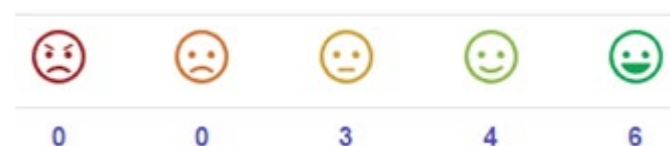


Fig.8. Réponse à la question « souhaitez-vous faire d'autres travaux sur les sciences et l'esprit critique ? ». Le fait que ce questionnaire ait été mis dans la phase « Aller plus loin » explique pourquoi seul un élève sur deux ait répondu.

Dans le cadre scolaire, le développement de l'esprit critique est pris en charge par les membres de l'équipe éducative. Une discussion d'une demi-heure sur la scientificité de l'astronomie et la pseudo scientificité de l'astrologie s'est donc déroulée en classe un mois et demi après cet ILS, suite au second confinement. Lors de cette discussion, le hors-série *Croyances et idées fausses en astronomie* du CLEA m'a été d'une grande utilité, ainsi que l'épisode de la chaîne You Tube Hygiène Mentale, « L'Astrologie - Les mauvaises critiques » (8).

En voici les résultats à l'issue d'un questionnaire anonymisé sous Socrative (9). À la proposition « L'astrologie et

l'astronomie sont des domaines : semblables / voisins / différents », 26 des 27 élèves présents ont répondu « différents », soit 96 %. La discussion précédente a donc permis de clarifier ces notions initialement confondues par 40 % des élèves. 93 % des élèves ont répondu « faux » à la proposition suivante « L'article du Cosmopolitan et plus largement l'astrologie étaient leur propos sur des preuves solides » et 70 % « vrai » à « L'article du Monde et plus largement l'astronomie étaient leur propos sur des preuves solides ». Il semble donc que l'astrologie du grec *ἀστρον*, astron, (« étoile ») et *λόγος*, logos (« discours ») soit bien distinguée de l'astronomie du grec *ἀστρονομία* (*ἄστρον* et *νόμος*) ce qui signifie loi des astres. Quant aux « manties » du grec *μάντις*, « devin », il est bien acquis qu'elles n'apportent aucune preuve. La réponse à la cette dernière proposition fait apparaître le manque de connaissance sur la manière dont la science se construit, du laboratoire aux médias. Pour conclure, à la question « Ces

travaux ont-ils fait progresser votre esprit critique ? Développer brièvement votre réponse », 100 % des élèves ont répondu par l'affirmative. Le travail est donc loin d'être fini, mais il y a une grande satisfaction de mesurer les progrès fait par les élèves afin d'aiguiser leur esprit critique.

Références

- (1) : bulletin officiel n° 30 du 25 juillet 2013 de l'éducation nationale <https://www.education.gouv.fr/bo/13/Hebdo30/MENE1315928A.htm>
- (2) <https://graasp.eu/>
- (3) Accessible à cette adresse <https://graasp.eu/s/mv0t1h>
- Les données sont anonymisées et conservées sur le serveur de l'EPFL.
- Je remercie vivement M Denis Caroti, chargé de mission Esprit Critique du Rectorat d'Aix-Marseille pour sa relecture et ses conseils avisés.
- (4) <https://www.cosmopolitan.fr/decouvrez-les-pires-dates-en-2020-selon-l-astrologie,2034398.asp>
- (5) <https://stellarium-web.org/>

- (6) <http://evilfer.github.io/planets/#!/>
- (7) https://www.lemonde.fr/sciences/article/2020/12/21/la-grande-conjonction-entre-les-planetes-jupiter-et-saturne-visible-dans-le-ciel_6064136_1650684.html
- (8) <https://www.youtube.com/watch?v=uG2PcA3Ynt0>
- (9) <https://b.socrative.com/>
- (6) <http://evilfer.github.io/planets/#!/>
- (7) https://www.lemonde.fr/sciences/article/2020/12/21/la-grande-conjonction-entre-les-planetes-jupiter-et-saturne-visible-dans-le-ciel_6064136_1650684.html
- (8) <https://www.youtube.com/watch?v=uG2PcA3Ynt0>
- (9) <https://b.socrative.com/>



Solutions des mots croisés page 21

Horizontalement

1. Spatiales. 2. Ariane. Ré. 3. Tir. Front. 4. EM (électromagnétique). Frères. 5. Lagrange. 6. liberté. 7. IR. Do. Spa. 8. Teneur. AM. 9. Argenté. 10. Sosie. UER. 11. Sacs. ESA.

Verticalement

1. Satellites. 2. Primaire. Os. 3. Air. GB. Nasa. 4. Ta. Frédéric (Frédéric Petit était un astronome du 19e siècle mais Frédéric est aussi le prénom du président du Clea). 5. Infrarouges. 6. Aèrent. Ré. 7. Orges. Nue. 8. Ernée. Pates. 9. Sets. Caméra.

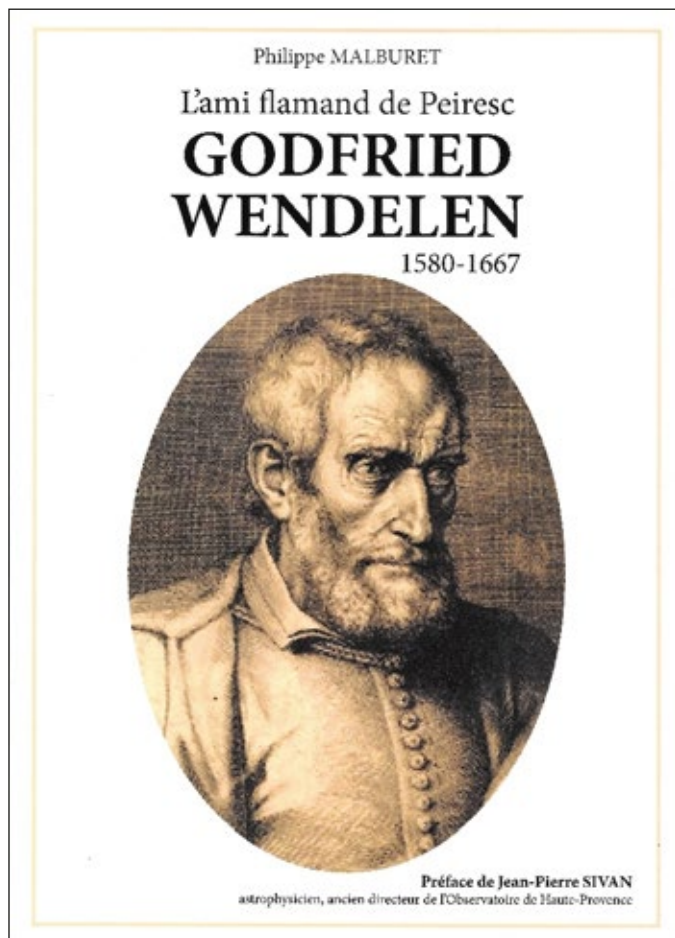
Godfried Wendelen

L'ami flamand de Peiresc

Philippe Malburet

Cet ouvrage qui comprend trois parties est accompagné d'une préface de Jean-Pierre Sivan, ancien directeur de l'observatoire de Haute-Provence.

L'auteur aborde successivement la vie de Godfried Wendelen, puis ses recherches avant de rappeler en annexe des notions d'astronomie.



Dans la présentation, l'auteur montre les points communs existant entre Wendelen et Peiresc. Nés tous les deux en 1580, jeunes gens curieux de tout et en particulier des sciences. Dans la lignée de Galilée et avec Gassendi, ils adopteront une méthode scientifique expérimentale, opposée à la pensée d'Aristote qui faisait encore consensus à l'époque.

Mais comment ce flamand, amateur d'éclipses a rencontré Peiresc le provençal ? C'est Wendelen qui à 18 ans ira en Provence où il restera jusqu'en 1612 après un court séjour en Italie (1600-1603).

La vie de Wendelen

Né à Herck-Ville près de Liège, il suit dans cette ville des études de latin, avant d'aller à Tournai et Louvain et dès son plus jeune âge il observe des éclipses de Lune.

Dès son arrivée en Provence il déterminera la latitude de Marseille. Puis l'auteur nous le fait découvrir comme précepteur, observateur, étudiant le droit, créant un observatoire. Et puis c'est le retour en Flandre où il devient curé, ouvre une école de mathématiques et continue à avoir de nombreux contacts avec les scientifiques de l'époque.

Durant cette période et contrairement à Peiresc qui ne nous laissa que des lettres et des carnets d'observation Wendelen écrit de nombreux ouvrages dont des traités d'astronomie.

Après s'être retiré à Gand, il meurt à 87 ans.

Les recherches de Wendelen

Celui-ci s'est intéressé à l'histoire, à la structure de la Terre, aux pluies de sang (comme Peiresc) et en particulier à l'astronomie : latitude, longitude, éclipses, distance de la Lune et du Soleil, comètes.

Il aborde le difficile problème de la détermination des longitudes terrestres en se basant sur l'observation d'une éclipse de Lune observée à partir de deux lieux.

Il écrira un ouvrage regroupant les observations d'éclipses, observations qu'il fera régulièrement.

L'auteur nous dévoile des énigmes. Wendelen a-t-il énoncé la troisième loi de Kepler huit ans avant celui-ci ? A-t-il été un précurseur de Newton ? (pour ce dernier, les arguments sont moins convaincants).

Comme Peiresc, avec qui il avait des centres d'intérêt communs, il était l'acteur d'une science moderne, basée sur l'expérimentation.

Les notions d'astronomie

Notre ami Philippe Malburet qui était professeur de mathématiques consacre la dernière partie de l'ouvrage à diverses notions d'astronomie : les parallaxes, les distances, les éclipses, les coordonnées terrestres, les lois de Kepler et les divers types d'années.

C'est un ouvrage qui se lit facilement.

Merci à Philippe Malburet d'avoir sorti de l'ombre cet humaniste dont un cratère lunaire porte le nom.

Jean Ripert