TELESCOOP



Vue d'artiste du JWST © ESA

EN DIRECT D'AILLEURS

ÉDITÉ CHEZ γ GAZINE

EDITO

Nous sommes un groupe de quinze élèves de seconde, qui avons partagé deux semaines ensemble dans le cadre de notre stage. Au début, nous ne nous connaissions pas. Nous étions préoccupés, presque apeurés, mais rapidement nous avons créé des liens profonds entre nous.

Durant une quinzaine de jours, nous avons visité une dizaine de laboratoires, assisté à d'innombrables conférences, amassé une quantité inimaginable de connaissances. Ce stage, parfois fatiguant, toujours amusant, a été une parade des métiers de l'espace, ingénieurs et scientifiques se succédant à un rythme effréné pour nous montrer leurs diverses professions.

En somme, nous avons découvert un autre monde (parfois littéralement) ! Ce fut une expérience inoubliable dont nous garderons toujours un précieux souvenir. Nous avons appris d'innombrables choses, mais surtout éveillé nos passions, dont nous chercherons, à travers cette revue, à vous transmettre une étincelle.

Par ces quelques pages, nous espérons que vous pourrez, vous aussi, sentir ce feu qui nous anime.

Pietro Rossi, Marjane Santucci, et Alexis Lebois



Pietro Rossi, Alexis Lebois, Louis Carayrol, Elioth Dupont, Chahine Yelles Chaouche, Sacha Emmel, Côme Beyssac, Timothé Le Hénaff, Marjane Santucci, Marie Pizana, Amélie Chun, Edwige Benanteur, Claire Yu, Nataniel Llano Martinez et une de leurs encadrantes Émilie Pernet.
Kolia Zaoui Hind, malheureusement absent ce jour là, et Audrey Le Reun, la deuxième encadrante qui faisait office de photographe, ne sont pas présents sur la photo.

SOMMAIRE

EDITO..... P2

NOTRE STARTER PACK..... P4
La minéralogie p4
Télédétection..... p6
Station Qualair..... p8
Le feu dans l'espace..... p12
Voyage au centre de la Terre..... p14
Géomagnétisme..... p17
Les aurores boréales..... p19
IGOSat, un petit dans la cour des grands..... p21
Le terahertz..... p24

ENTRE CIEL ET TERRE..... P26
Sismologie..... p26
Persévérance..... p28
La médecine spatiale..... p32
À la découverte des lunes du système solaire..... p36

VERS L'INFINI ET AU DELA..... P37
Les ondes gravitationnelles..... p37
L'étude des galaxies lointaines..... p39
Pas d'idées, trou noir..... p40
Sursauts gamma..... p43

REMERCIEMENTS..... P46

LES MOTS DES STAGIAIRES..... P47

LA MINERALOGIE

En 10 cristaux remarquables



Cerusite © Telescoop

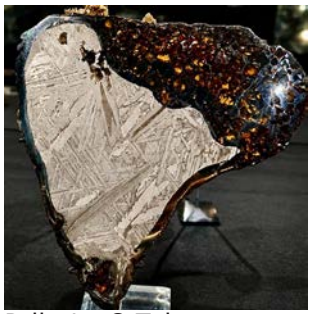
La **Cérusite** en « sapin », attire l'œil par sa forme en pâles cristaux de neige… Elle est composée de carbonate naturel et de plomb. Le spécimen exposé à la collection minéralogique de Sorbonne Université est issu du gisement de Tsumeb, en Namibie, surnommé « le Trou Profond ». Il est réputé pour ses minéraux remarquables. C'est l'une des seules pierres – avec le diamant – à posséder un éclat adamantin, c'est-à-dire le plus brillant possible.



Stalacticte © Telescoop

La stalactite de **Gypse** s'est formée au fond d'un gisement marocain. Pendant des années, l'eau s'est infiltrée dans des anfractuosités de la roche, charriant avec elle des éléments minéraux et les déposant, goutte à goutte, dans les souterrains. Mais des courants d'air ont modifié le trajet des gouttes ! Celles-ci se sont peu à peu cristallisées, donnant naissance à cette forme torsadée.




Pallasite © Telescoop

La **Pallasite** est une roche d'origine extraterrestre. Elle appartient au groupe des météorites pierreuses et ferreuses et est constitué de cristaux d'olivine verte, noyés dans du fer et du nickel. La formation des pallasites a longtemps été discutée mais l'hypothèse adoptée serait qu'elles se formeraient lors de la collision d'un astéroïde avec un autre corps céleste. Au moment de l'impact, le fer fondu du noyau de l'impacteur se mélange au manteau riche en olivine de sa cible.


Azurite © Telescoop

L'**Azurite**, issue du gisement de cuivre de Bisbee (qui fut l'un des plus riches d'Arizona) et la malachite sont des carbonates de cuivre. L'une accompagne souvent l'autre, bien que leur couleur diffère. En effet, la malachite se forme par transformation de l'azurite sous l'effet de l'eau et du dioxyde de carbone. L'azurite se présente souvent sous forme de cristaux et la malachite sous forme de concrétions. Cependant, le spécimen d'azurite de la collection minéralogique de la Sorbonne est concrétionné, tandis que la malachite se présente sous forme de cristaux ! Ce qui est un défi pour n'importe quelle collection sérieuse…



Shattuckite © Telescoop

La **Shattuckite** est un silicate de cuivre relativement rare qui se forme dans les zones désertiques au cœur des gisements de sulfure du cuivre. Elle a été pour la première fois découverte dans les mines de Bisbee en Arizona, plus précisément la mine Shattuck, d'où elle tire son nom. Contrairement à certains cristaux formés dans les premiers stades de cristallisation, la shattuckite est un minéral secondaire, né de l'oxydation du sulfure de cuivre par les eaux souterraines, l'air et les processus géologiques naturels.

La **Neptunite** est un silicate rare qui doit son nom à Neptune, dieu romain de la mer. Minéral piézoélectrique, il génère une charge électrique en réponse à une pression ou à une contrainte mécanique, ce qui peut être utile pour des applications scientifiques ou technologiques, comme pour des dispositifs convertissant l'énergie mécanique en électricité.

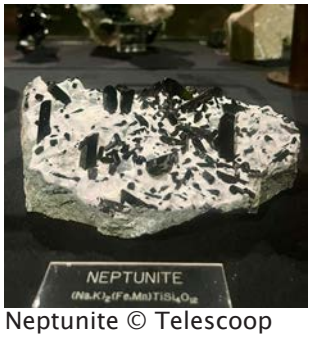
La **Tourmaline** est une appellation regroupant en réalité une dizaine de minéraux, prenant le nom de minéraux « arc-en-ciel » car ils peuvent en revêtir toutes les couleurs. Selon la teinte de ces cristaux, la tourmaline peut prendre le nom de « rubellite » (rouge), « indicolite » (bleu) ou encore « sibérite » (pourpre). Elle peut également présenter différentes couleurs en son sein, on les appelle alors bicolores ou polychromes. Les tourmalines « melons d'eau » sont des bicolores qui ont des teintes roses qui vont vers de l'incolore avant d'atteindre une couleur vert clair. Ils sont particulièrement recherchés. Le spécimen de tourmaline de la collection minéralogique de Sorbonne Université en est justement un.

L'**Opale** tire son nom du sanskrit (langue indo-européenne) « upala », ce qui signifie « pierre précieuse ». La formation de cette pierre aux reflets irisés allie mondes vivant et minéral. En effet, dans les eaux riches en silice, de nombreux microorganismes peuvent y vivre et développer leur squelette composé de ce minéral. Après leur mort, leur corps se dépose au fond de l'eau et continue d'accueillir ces mêmes cristaux de silice. Quand les conditions idéales sont réunies, au bout de quelques centaines de millénaires, l'opale va se former au fur et à mesure que l'eau s'extraira de la concrétion minérale. L'opération peut se réaliser dans des cavités rocheuses, des os, des coquilles et même du bois fossilisé. Si les sphères de silice se déposent de manière régulière, leur agencement fera briller la pierre de mille feux !

La **Halite**, plus connue sous le nom de sel gemme, s'est formée il y a plusieurs millions d'années lorsque d'anciennes mers se sont évaporées. Quand l'eau disparaît avec la chaleur, le sel dissous cristallise petit à petit et forme de grosses couches dans les sous-sols. Les gros blocs exposés dans les collections montrent les cristaux en forme de cube. Ce minéral est surtout composé de chlorure de sodium, le même sel que dans nos cuisines.

L'**Amiante** est faite de fines fibres minérales naturelles. Le chrysotile, qui est la variété la plus courante, fait partie du groupe des serpentines. Il se reconnaît à ses fibres souples et soyeuses. Pendant des dizaines d'années, il a été utilisé pour isoler les maisons et résister au feu. Aujourd'hui, il est interdit dans beaucoup de pays parce que respirer ses fibres peut provoquer des cancers, celles-ci étant toxiques.

Marjane Santucci, Côme Beyssac



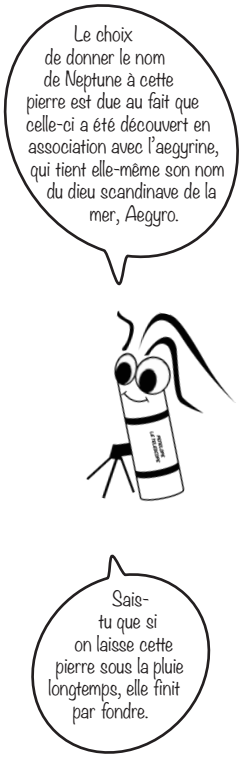
Neptunite © Telescoop


Tourmaline © Telescoop


Opale © Telescoop


Malachite ©Telescoop


Chysotile © Telescoop



TELEDETECTION

Lorsqu'en 1858 Nadar prend la première photo aérienne à partir d'une montgolfière, il donne naissance à la télédétection. Cette technique, pratiquée à partir des satellites depuis le début de l'ère spatiale, n'a fait que gagner en prévalence avec le temps. La **télédétection** comporte l'ensemble des efforts de détection de structures sur les terres ou sur les mers à partir de l'air ou de l'espace, mais elle englobe aussi l'analyse et l'interprétation des observations obtenues.



Le satellite Landsat 1, lancé en 1972, est le premier satellite d'observation de la Terre à but non-militaire. Ces images sont disponibles gratuitement et permettent de découvrir le sol terrestre jusqu'à une résolution de quatre mètres. Après Landsat 1, de nombreux autres satellites d'observation ont eux aussi publié gratuitement leurs images, au profit de la communauté scientifique. L'étude des images permettent de déceler de nombreuses informations qui seraient sinon difficilement accessibles : recul de glaciers, la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre, le statut de la couche d'ozone, la propagation des désastres naturels... La télédétection permet d'ailleurs l'étude de la biodiversité, par l'abondance des espèces et l'enchaînement des saisons. Elle est donc un outil de plus en plus crucial pour combattre le changement climatique.


Landsat 1 ©NASA

Il existe différents types de télédétection qui vont être utilisés en fonction des spécificités du domaine d'étude. Selon la source du rayonnement étudié, ces types vont s'inscrire eux-mêmes dans différentes catégories.

La télédétection **passive** capte des rayonnements sans en émettre. Cette catégorie comprend les télédétections optique et thermique. La télédétection optique étudie le rayonnement solaire réfléchi par l'objet observé. Elle est grandement utilisée en cartographie et particulièrement pertinente dans le suivi de phénomènes environnementaux comme la déforestation. La télédétection thermique étudie le rayonnement dit thermique émis par les objets eux-mêmes, et permet notamment le suivi de température des eaux.

La télédétection **active** s'appuie sur l'étude d'un rayonnement émis par l'instrument utilisé qui va ensuite être réfléchi par l'objet étudié. Dans cette catégorie, on retrouve principalement les télédétections par radar et LiDAR. Les capteurs radar émettent des ondes en biais vers une surface et étudient la part qu'elle réfléchit pour en déterminer les propriétés. Par exemple, si l'onde est confrontée à une surface lisse, elle sera entièrement réfléchie mais déviée hors du champ de réception du capteur, ce qui permet d'identifier, par exemple, les marées noires.

Les capteurs LiDAR, quant à eux, emploient des ondes laser de vitesse connue et mesurent le temps écoulé entre leur émission et leur réception afin de déterminer la distance qui les séparent de la surface. Ils permettent alors de modéliser le terrain ce qui est notamment utile pour étudier son histoire.

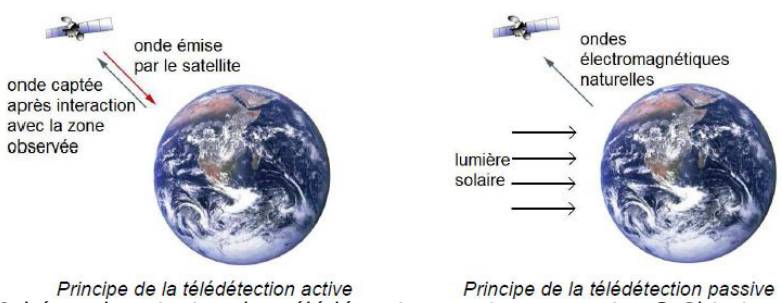
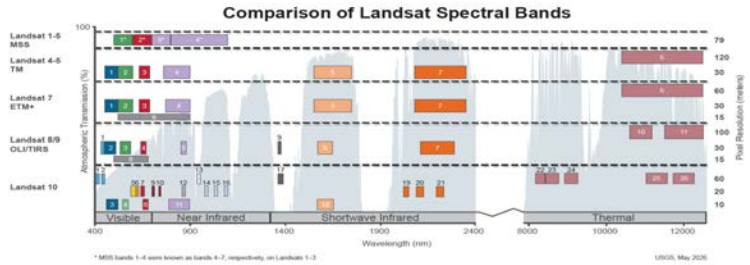


Schéma du principe des télédétections active et passive © Chimix

Ces différents types de télédétection ont chacun leurs avantages et inconvénients. Les capteurs passifs sont peu coûteux mais sont fortement impactés par les conditions environnementales (nuages, jour, nuit...) tandis que les

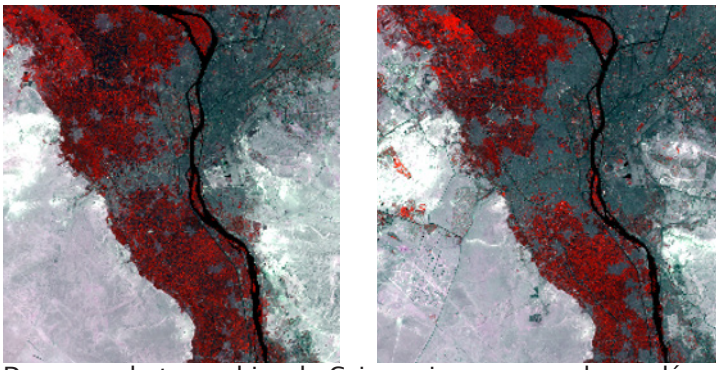
capteurs actifs sont plus chers mais capables de fonctionner peu importe les conditions environnementales. Au final, ils se complètent les uns des autres, et leur usage combiné permet d'améliorer la précision d'une information !

Cependant, les satellites optiques ne sont pas limités à la lumière visible. En effet, la lumière que nos yeux perçoive n'est qu'une petite partie du spectre électromagnétique. Des longueurs d'onde qui nous sont invisibles permettent de déceler de nombreuses structures… En effet, tout objet émet un rayonnement qui lui est propre à partir duquel on peut donc en déduire sa nature. Les satellites d'observation sont donc conçus pour étudier non pas un spectre continu de lumière, mais plusieurs bandes de lumière.



Comparaison des bandes spectrales de Landsat
©Landsat missions

Par exemple, Landsat 4 comporte sept bandes spectrales, du bleu jusqu'aux hauts infrarouges. Les différents capteurs du satellite, spécialisé dans la détection d'une bande de lumière, vont pour chaque pixel, lui associer une valeur de 0 à 1 selon sa luminosité sur cette longueur d'onde. Ce processus est répété sur chaque bande de lumière. Le scientifique peut ensuite utiliser des logiciels spécialisés tels que QGIS pour associer à trois bandes de son choix les trois couleurs visibles à l'œil humain : le rouge, le vert et le bleu. Il obtient ainsi une image prête à l'analyse, traitée afin de mettre en contraste ce qu'il veut déceler.


Dans ces photographies du Caire, prises avec quelques décennies d'écart, l'association du rouge à des bandes infrarouges (que les plantes absorbent peu et donc réfléchissent en large quantité) permet de mettre en évidence la présence de végétation ! On peut d'ailleurs constater l'expansion de la ville et la création de nouveaux quartiers à l'ouest.

La disponibilité des données satellitaires sous forme brute depuis les années 70 permet d'ailleurs d'étudier non seulement l'évolution du climat, mais aussi des villes, et même de leurs quartiers.

De nos jours, on peut voir des milliers de photographies satellitaires de presque tous les coins du globe. Grâce à ces innombrables données, on peut en faire tout autant de découvertes. La télédétection nous a donné des cartes parfaites, une compréhension profonde de notre atmosphère, et une arme puissante contre les désastres naturels. Mais l'ascension de la télédétection n'est pas proche de s'arrêter : où est-ce qu'elle nous mènera demain ?

Pietro Rossi & Timothé Le Hénaff

STATION QUALAIR

Les coulisses de l'étude du climat et de la pollution

« La Terre est une communauté à laquelle nous appartenons, non une marchandise que nous possédons. » - Aldo Leopold

Le ciel est le miroir de la Terre. Ce que nous rejetons dans l'air finit toujours par redessiner nos paysages et réécrire notre avenir. Pendant des siècles, nous avons cru l'atmosphère infinie, capable de dissiper les fumées de notre développement. Aujourd'hui, l'étude du climat nous montre le contraire : la pollution locale est devenue une crise globale.

Cela vous est sans doute déjà arrivé de regarder la pollution de l'air dans votre ville ou bien de rechercher comment la température aura évolué dans 10 ans. Mais vous êtes-vous demandé qui était derrière ces mesures et prédictions ? C'est ainsi que nous allons vous emmener dans l'une des coulisses de ce que vous voyez afficher sur vos écrans ; la station Qualair de Sorbonne Université.

Perchée sur les toits de Paris, la station Qualair est une plateforme de recherche expérimentale dédiée à l'observation des variabilités chimiques et dynamiques de la basse atmosphère terrestre. Afin d'arriver à des résultats précis, elle utilise différents types d'instrumentation de pointe et se situe au centre de la capitale pour capter au plus près les dynamiques de la pollution urbaine et croiser ses mesures locales avec les modèles climatiques globaux.

Plongeon dans la pollution



Schéma explicatif de l'effet de serre
© DREAL Auverge-Rhône Alpes



© Lionel Bonaventure &
Stephan Leuzinger

Qu'est-ce concrètement que la **pollution** dont nous entendons tous parler quotidiennement ? À l'origine, une grande partie de nos activités (transports, industries, chauffage) rejette des gaz qui accentuent l'effet de serre. Naturellement, ce phénomène est bénéfique puisqu'il piège une partie du rayonnement solaire pour maintenir la Terre à une température vivable.

Mais l'excès de polluants transforme ce thermostat en véritable serre surchauffée. Dans cette atmosphère, on croise différents polluants : des particules fines issues des pots d'échappement, mais aussi de l'ozone. Ce dernier est d'autant plus dangereux qu'il nous est totalement invisible et inodore, ce qui rend sa détection impossible. En outre, s'il nous protège des UV à hautes altitudes, il devient un polluant toxique et agressif pour nos poumons lorsqu'il se forme ici-bas, en été, sous l'effet du soleil et de la chaleur.

Ce phénomène est intimement lié à la **couche limite**, cette couche d'air la plus basse de l'atmosphère qui subit directement l'influence du sol. Son épaisseur change constamment. La journée, sous l'effet de la chaleur du soleil, l'air se dilate et la couche limite monte, ce qui permet aux polluants de se diluer dans un plus grand volume. Le soir et en hiver, elle s'écrase près du sol, emprisonnant toute la pollution de la ville sous une sorte de couvercle invisible.

Mais bonne nouvelle, la pollution peut diminuer ! Les mesures à long terme le prouvent : à Paris, la qualité de l'air s'est globalement améliorée depuis 30 ans, notamment grâce à l'interdiction de certains carburants, aux normes industrielles plus strictes (tels que les protocoles européens de 1960) et à la réduction de la pollution émise par les automobiles.

Alors, si le ciel parisien porte encore les stigmates de nos activités, le travail minutieux de la station Qualair nous rappelle que l'on ne peut réparer que ce que l'on sait mesurer. Observer notre atmosphère, c'est s'armer de connaissances pour faire de nos villes des espaces plus respirables et durables.

SOS Climat

Malheureusement, on ne peut pas en dire autant pour le climat... qui est pourtant un problème majeur pour notre planète ! Vous en observez les effets en premières loges : sûrement au moins une fois cet été vous êtes-vous plaint de la chaleur insupportable, qui est « pire que l'année dernière » ... une réflexion que vous remarquerez avoir prononcée l'année d'avant, et celle qui la précède.

À l'heure actuelle, le réchauffement climatique est un phénomène réel dont on parle beaucoup, mais que l'on ne comprend pas pleinement. Apprenez-en donc plus : qu'est-ce que c'est, au juste, ce climat et son réchauffement ? Le climat est une notion parfois floue, souvent confondue avec d'autres comme la pollution ou la météo. Il est donc impératif avant toute chose de la clarifier. Le **climat** désigne l'ensemble des phénomènes qui caractérisent l'atmosphère terrestre sur une durée étendue, tandis que la **météo**, tout comme la **pollution**, désignent les études respectives du temps et de la composition de l'air sur une très courte durée. Si ces phénomènes sont en corrélation, ils ne sont pas confondus : dire que la météo est « bonne » demain ou que la pollution « diminue » ne revient donc pas à affirmer que le climat s'améliorera. Cette confusion complexifie en grande partie la prise de conscience du véritable enjeu de la situation actuelle.



Fossoysseur de charbon © Reporterre

Mais qu'est-ce qui cause cette évolution inquiétante du climat ? Dans l'atmosphère terrestre, il existe naturellement certains gaz comme la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, ou le méthane, capables de retenir une partie de la chaleur des rayons solaires : ce sont des

gaz à effet de serre. Ceux-ci induisent un phénomène naturel appelé **l'effet de serre**, qui retient une partie des rayons solaires de manière à ce que la Terre les absorbe. Ainsi, environ 70 % de l'énergie solaire est captée et 30 % est renvoyée vers l'espace : c'est **l'effet albédo**. Cette chaleur est ensuite absorbée par le sol, qui émet à son tour des rayons infrarouges retenus par les gaz à effet de serre. Ce processus naturel est indispensable à la vie sur notre planète : sans lui, les températures terrestres seraient glaciales ! Son rôle régulateur est donc un élément majeur.

Mais aujourd'hui, l'intensification des activités humaines et l'exploitation des énergies fossiles causent une augmentation intense et rapide des émissions de gaz à effet de serre. Or, cette augmentation est plus rapide que la Terre n'est capable de les absorber, ce qui cause un déséquilibre et une hausse considérable de leur concentration dans l'atmosphère : c'est **l'effet de serre additionnel**. Puisqu'une plus grande partie de la chaleur du Soleil est piégée, le climat se retrouve modifié. Les températures grimpent, ce qui a aussi des répercutions sur les vents et les précipitations. Ainsi, le printemps 2026 a été le plus chaud jamais enregistré jusqu'ici.

Pourtant, le passage à l'action s'avère difficile. En effet, un problème majeur avec ce changement climatique, c'est qu'une grande partie des gaz a une durée de vie très longue. Le dioxyde de carbone, par exemple, persiste près de 100 ans dans l'atmosphère après avoir été émis ; son accumulation le rend donc nocif sur le long terme. Aujourd'hui, les gaz à effet de serre sont déjà présents en trop grande quantité dans l'atmosphère. Et ils ne cesseront d'être effectifs jusqu'à la fin de leur vie. Ainsi, sur les 100 prochaines années, même si toute la population terrestre cessait d'émettre tout gaz à effet de serre, les effets du réchauffement climatique entamés par les générations précédentes continueraient de se faire ressentir. Cette absence de résultats fulgurants à court terme explique pourquoi nous avons aujourd'hui tant de mal à mettre en place des mesures efficaces pour lutter contre ce changement climatique. Beaucoup ne parviennent pas à renoncer au confort d'aujourd'hui pour le bien de demain si ce futur n'est pas le leur. Cette mentalité ne fait pas disparaître la nécessité d'agir bien réelle. Si chaque tonne de CO_2 émise contribue au réchauffement mondial, alors chaque tonne non-émise contribue à ne pas agraver la situation. En outre, la réduction d'autres gaz à effet de serre à durée de vie plus courte entrainerait une amélioration à plus court termes. Alors gardez espoir, et faites de votre mieux à votre échelle !

Des instruments qui jouent au rythme de l'environnement



Qualair : plateforme instrumentale ©Sorbonne Université

Pour mieux comprendre et surveiller l'état de notre atmosphère, la Station Qualair dispose d'une plateforme composée de différents instruments technologiques, dont 3 principaux : un LiDAR, un instrument in-situ et un spectromètre. Le LiDAR émet son propre faisceau laser qui traverse l'atmosphère et entre en contact avec toutes les particules se trouvant sur son chemin. Ce laser est alors réfléchi et rétrodiffusé vers le capteur. En mesurant le temps entre l'émission et la réception, le LiDAR arrive à définir sa distance au sol ainsi que la répartition verticale des particules. Dans l'objectif de la station, le LiDAR se concentre sur l'évolution de la pollution au sol, grâce à la mesure les particules, ce qui permet aux scientifiques de déterminer la couche limite atmosphérique. L'instrument in situ est un dispositif constitué d'un système de pompage qui prélevant l'air extérieur de façon très précise. L'air aspiré est ensuite analysé, ses propriétés transformées en signaux électriques, qui seront eux-mêmes alors décodés par des logiciels ou des outils, afin d'étudier le climat. Les observations in situ permettent d'obtenir des données sur l'atmosphère locale très précisément. Ses mesures sont essentielles pour caractériser la qualité de l'air mais aussi pour confirmer des observations issues de la télédétection. Le spectromètre, lui, va décomposer les rayons lumineux provenant du Soleil en un spectre à partir duquel il sera possible de déterminer la composition optique des gaz et particules. Cette méthode est très utile aux scientifiques pour comprendre des enjeux environnementaux tels que la pollution.



Conclusion : soyez optimistes malgré tout !

Edwige Benanteur, Amélie Chin et Claire Yu

LE FEU DE L'ESPACE



Triangle du feu
© Gustavb

Le feu fut la première découverte de l'Homme et il nous suit encore jusqu'aux fin fonds de l'Univers. En effet, les astronautes démarrent leurs voyages sur des colonnes de feu, puis combattent les flammes au sein de leurs stations et capsules.

Le feu est un risque majeur pour l'exploration spatiale. Ses fumées nocives ne peuvent pas se dissiper au sein d'une station hermétique. Sa combustion peut consommer en même temps les êtres vivants et les murs des habitats, exposant les astronautes au vide de l'espace.

D'ailleurs, son comportement dans l'espace est encore peu étudié : une flamme acquiert sa forme caractéristique grâce à la poussée d'Archimède, qui fait monter les gaz chauds et moins denses que l'air environnant. Mais en microgravité, la poussée d'Archimède ne s'applique pas, les flammes prennent donc une forme circulaire. Leur direction est donc extrêmement sensible à l'environnement. Les flux d'air causés par les systèmes de ventilation vont faire glisser l'air ambiant, recréant la forme traditionnelle d'une flamme. Les atmosphères des stations spatiales sont différentes de celle de la Terre : elles ont généralement de plus basses pressions atmosphériques, portant le moins d'air possible, mais sont composées en plus grande partie de dioxygène, car ce gaz est vital pour les astronautes. Le risque de feu est donc accru.

Or, le feu n'est pas une simple possibilité puisqu'il s'est déjà déclaré dans l'espace. En effet, en 1997, le générateur de dioxygène de la station Mir a défailli, provoquant une flamme de plus d'un mètre de long pendant quatorze minutes. Les astronautes ont dû utiliser des respirateurs pendant quarante-cinq minutes à cause des fumées relâchées. Si les flux d'airs avaient orienté la flamme vers les murs de l'habitat, ils auraient pu fondre, exposant les astronautes au vide cosmique et mettre ainsi leur vie en péril. La question se pose donc de comment combattre le feu dans l'espace. Les extincteurs traditionnels semblent une solution simple mais ils sont consommables, ils contaminent l'atmosphère close de la station, et ils peuvent endommager les instruments électroniques vitaux qui couvrent chaque mur des stations et des vaisseaux spatiaux.

De nombreuses équipes travaillent donc sur des nouveaux moyens de combattre le feu



Comportement des flammes dans l'espace
© NASA


Les dégats du feu sur la station MIR © ESA

dans l'espace, en préparation des prochaines missions spatiales qui seront certainement bien plus longues que celles effectuées jusqu'à maintenant. À l'Institut Jean le Rond d'Alembert, des chercheurs étudient une possibilité : le son !

En effet, le son est une vague qui se propage d'air ; une suite de dépressions et de surpressions. Il déforme donc la flamme, l'éloigne de son combustible et ainsi, l'éteint.

Cependant, le développement de cette méthode à ses difficultés. La direction d'où provient le son doit être aligné avec celle de la flamme pour une efficacité maximale, et la puissance électrique requise peut être prohibitive (Ces sons doivent être au minimum de 90 décibels…).

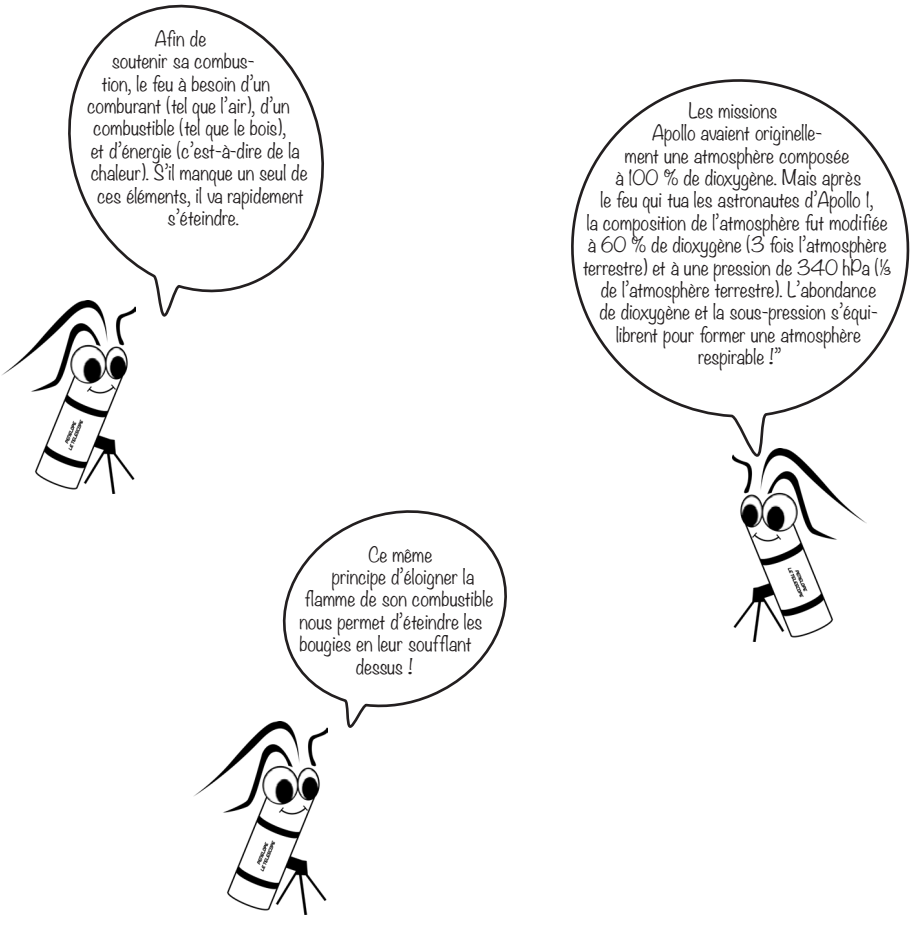
Mais les chercheurs de l'institut continuent à travailler sur ces problèmes, et les ingénieurs du monde entier conçoivent de nouvelles méthodes pour combattre notre plus vieil ennemi, qui nous poursuivra probablement toujours, peu importe où nous allons.

Timothé le Hénaff et Pietro Rossi



Avec l'instrument UNBURNIT, les chercheurs de l'Institut Jean le Rond d'Alembert étudient leur méthode pour éteindre le feu © Telescoop

Le savez-vous ?



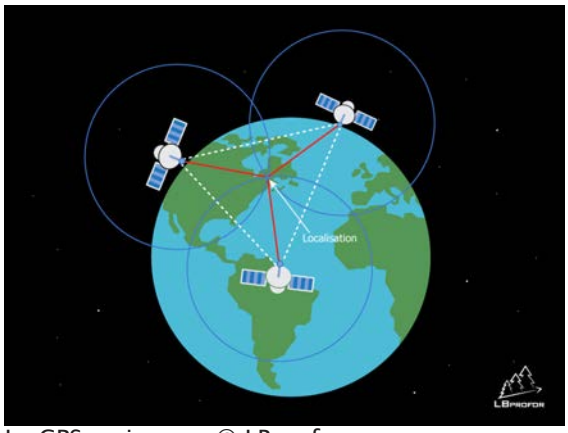
VOYAGE AU CENTRE DE LA TERRE

« La Terre n'est pas seulement notre maison, c'est un organisme vivant dont nous commençons à peine à décoder les pulsations » - James Lovelock

Connaissez-vous ces deux sciences essentielles à notre existence ? Si ce n'est pas le cas, bienvenue dans cette nouvelle aventure. Accrochez vos ceintures, et c'est parti !

Direction : la Géodésie

Géodésie, ce mot compliqué à première vue désigne tout simplement la « science de l'emplacement des choses ». Cela implique donc de mesurer la forme et les dimensions de la Terre dans le temps. En effet, vous n'êtes pas sans savoir que la Terre n'est pas un caillou immobile mais bien une planète en constant mouvement !



Le GPS en images © LBprofor

Ces variations sont aujourd'hui mesurables de manière extrêmement précise grâce à un outil que vous connaissez bien : le **GPS**. Un réseau de satellites envoie des signaux radio en continu vers la Terre. En calculant le temps mis par ces signaux pour atteindre un récepteur au sol, l'appareil détermine sa position exacte au millimètre près. On peut ainsi déterminer comment la position des objets évolue au cours du temps.

Mais alors, quelles sont les causes de ces fluctuations ? Il n'existe pas de réponse simple à cette question car cela dépend de l'emplacement et des conditions qui y sont associées. Nous vous invitons à explorer 5 différents cas. À Paris, le sol bouge à cause de la tectonique des plaques. La ville dérive ainsi vers le nord-est d'environ 2,5 centimètres par an. À Venise, ce sont les activités humaines – l'extraction passée de l'eau des nappes souterraines – a compacté le sol, entraînant un affaissement progressif de la ville. En Amazonie, le phénomène est cyclique et lié aux saisons : le poids des pluies torrentielles surcharge la croûte terrestre et fait descendre le sol de plusieurs centimètres avant qu'il ne remonte à la saison sèche. Au Japon, marqué par le terrible séisme de 2011, la Terre possède une sorte de « mémoire de forme », c'est à dire que la croûte terrestre continue de se déformer et de s'ajuster lentement, même des années après la secousse. À l'Île de la Réunion, l'activité du Piton de la Fournaise dicte le mouvement. La pression du magma fait gonfler les flancs du volcan avant une éruption, puis le sol se dégonfle et reprend sa forme initiale une fois la lave libérée.

Ainsi, la géodésie nous montre que notre planète est un organisme vivant, déformable et en perpétuelle évolution. Grâce au GPS et aux outils géodésiques, nous ne nous contentons plus de cartographier la Terre, nous mesurons sa dynamique pour mieux anticiper son avenir et nous y adapter.

Changement de trajectoire : vers la Géophysique

Quand on y réfléchit bien, la science à la base de notre existence serait probablement la géophysique. Grâce à elle, l'être humain est capable de comprendre la planète sur laquelle il vit, de quoi elle est composée et ce à quoi elle pourrait être confrontée dans l'avenir. La géophysique sonde en profondeur l'atmosphère, les océans et les couches internes de notre planète bleue. Malheureusement, *Voyage du centre de la Terre (Jules Verne, 1864)* ne reste qu'une histoire et nous sommes bien incapables d'aller voir avec nos propres yeux ce qui bouillonne sous nos pieds. Pour le découvrir, nous devons donc utiliser des moyens indirects tel que la sismologie.

Les manuels de physique nous explique que g, la constante de gravité, est constante en tout point de la Terre. Ce n'est pourtant pas tout à fait exact. Un objet tombera plus ou moins vite selon la masse de ce qui se trouve en dessous de lui. C'est en analysant ces variations de pesanteur que l'on peut déterminer les caractéristiques des couches internes de notre Terre. Par exemple, g a une valeur de 9,81 N/kg au niveau de l'équateur mais de 9,83 N/kg aux pôles. Ces fluctuations de pesanteur sont donc dues à l'hétérogénéité des masses se trouvant en profondeur. Cependant, la pesanteur peut également varier au cours du temps sous l'influence de ce que l'on appelle, les marées terrestres. Comme nous le savons, la Lune et le Soleil sont responsables de nos marées océaniques mais ces astres ont également une conséquence sur le globe terrestre ! Ainsi, chaque jour nous nous rapprochons et nous éloignons du centre de la Terre d'une dizaine de centimètres ! Nous n'en ressentons évidemment pas les effets car cela se fait à très grande échelle.

Rebond post-glaciaire : un sentier entre géodésie et géophysique

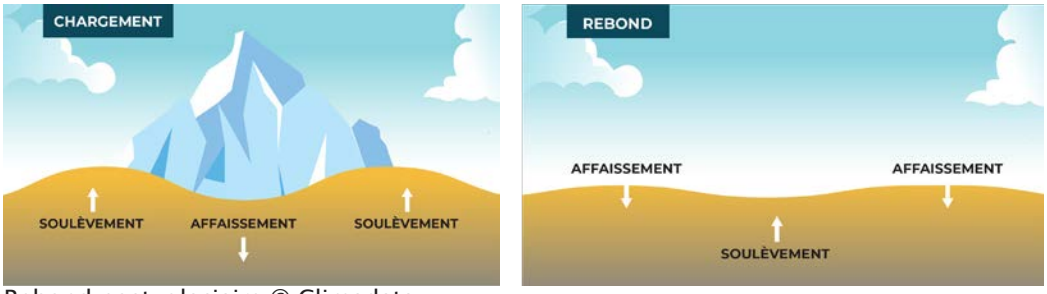
Nous sommes tous d'accord sur le fait que tous les matins, lorsqu'on se lève (avec un air ronchon... oui TOUS), notre lit ne se reforme pas à l'instant même où notre corps endormi s'en extirpe. Et bien, dites-vous que cette expérience quotidienne se passe aussi à une plus grande échelle, où le lit n'est que la Terre ! Mesdames, messieurs, il est l'heure de vous parler du rebond post-glaciaire, qui combine avec brio géodésie et géophysique.

Tout d'abord, le rebond post glaciaire désigne le soulèvement progressif de la surface terrestre à la suite d'un épisode de fonte des glaces. On l'observe principalement dans les régions anciennement recouvertes par des calottes de glace, comme le Canada, la Sibérie, l'Écosse ou les pays scandinaves. Pendant la glaciation, l'épaisseur des calottes varie en fonction du climat et des cycles astronomiques (inclinaison de la Terre, etc.). Au fil du temps, l'accumulation de glace exerce une pression énorme sur la croûte terrestre qui s'enfonce alors dans le manteau supérieur. Celui-ci, sous l'effet de cette charge, se déforme latéralement. La manière dont la lithosphère se déforme dépend directement des propriétés mécaniques du manteau, notamment de sa viscosité. Plus la viscosité est élevée, plus le manteau mettra du temps à réagir : le rebond sera lent. Plus la viscosité est faible, plus le manteau s'ajuste rapidement et le rebond rapide. Lorsque les glaces fondent, la charge disparaît. La croûte commence alors à se soulever : c'est le **rebond**. Ce soulèvement est d'abord rapide (réponse élastique), puis devient très lent (réponse visqueuse), pouvant durer des milliers d'années. Pendant ce temps, le manteau remonte progressivement pour compléter de nouveau la zone déglacée.

Cette manifestation n'est pas sans conséquence. Certains effets sont visibles, d'autres invisibles à nos pauvres yeux humains. Parmi ceux observables, il y a le soulèvement du sol ou encore la réactivation de failles anciennes, qui peut provoquer une sismicité intraplaque. Du côté des effets invisibles, on observe notamment des variations de la

gravité. Elle diminue lorsque la glace fond (perte de masse), puis elle varie à nouveau lorsque la croûte se soulève et que le manteau se réorganise en profondeur.

Le rebond post-glaciaire combine ainsi géodésie et géophysique dans une situation



Rebond post-glaciaire © Climadata

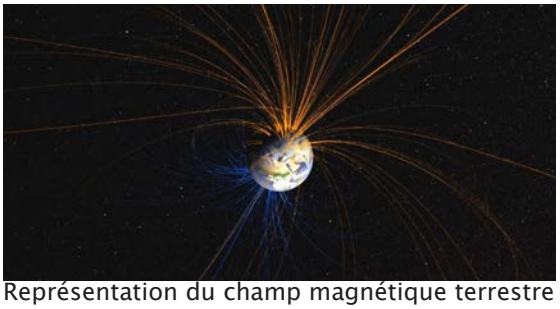
universelle qui nous concerne tous.

Amélie Benanteur, Amélie Chun et Marjane Santucci

Fun fact !



GEOMAGNETISME



Représentation du champ magnétique terrestre
© NASA Goddard space Flight Center/Flickr

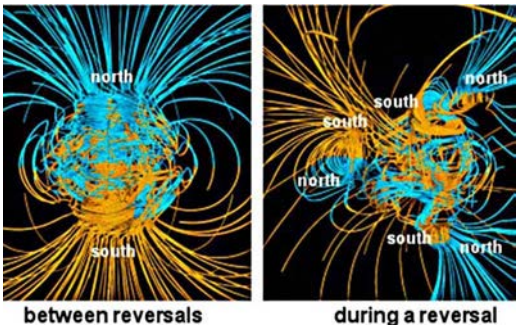
Vous avez sûrement déjà entendu parler du champ magnétisme, cette mystérieuse force qui guide vos boussoles. Mais de quoi s'agit-il exactement ? Quel est son rôle et comment l'observe-t-on ? Découvrez-le dans cet article !

Le magnétisme terrestre, ou **géomagnétisme**, désigne l'effet du champ magnétique terrestre. Il est produit par l'ensemble des sources magnétiques, courant électriques ou matière aimantée que l'on trouve à l'intérieur de la Terre, à sa surface et dans son environnement spatial proche. Notre **champ « principal »**, celui qui oriente vos boussoles vers le Nord, est généré dans le noyau externe de notre planète par des mouvements de métal liquide : la géodynamo, active depuis au moins 3,4 milliards d'années ! Celui-ci occupe un rôle central à la vie puisqu'il permet aux espèces animales et bactériennes de s'orienter dans l'environnement et, plus important encore, constitue un bouclier de protection contre les rayonnements cosmiques et les particules chargées du vent solaire ! Il est aussi à l'origine d'autres sources de champ magnétique sur Terre. Une partie du champ provient de roches de la croûte, comme le basalte, qui se sont aimantées au cours du temps. Une autre source de ce champ provient des courants électriques de l'atmosphère, qui apparaissent lors de l'interaction entre le champ magnétique « principal », cette même atmosphère, et le vent solaire. Ceux-ci sont ensuite responsables de l'apparition d'autres courants au niveau de la croûte et du manteau terrestre. Enfin, même les océans, parcourus par de faibles courants électriques, constituent une source du champ. Vous rendez-vous compte de son étendue, à présent ?



Mais le champ magnétique de la Terre n'est pas un phénomène constant. Au contraire, il est très dynamique, et son évolution observable, même à l'échelle humaine ! Ainsi, les pôles magnétiques Nord et Sud se déplacent irrégulièrement au cours du temps. Dans les années 1990, par exemple, le pôle Nord qui évoluait à une vitesse d'environ 15 km par an, s'est soudainement mis à se déplacer à près de 60 km par an ! Une autre manifestation de cette dynamique est l'existence d'une forte anomalie, dite « **anomalie de l'Atlantique Sud** » où le champ magnétique est considérablement plus faible. Au cours des 30 dernières années, elle s'est considérablement étendue et l'intensité du champ y a diminué de 5% ! Cela cause un problème pour les satellites à basse orbite puisque la protection contre les rayonnements dont ils bénéficient est réduite. Cela souligne l'importance de ce champ : il est donc impératif de pouvoir l'étudier !

Face à la complexité du champ magnétique terrestre et à son évolution permanente, les scientifiques ont mis en place des moyens d'observation toujours plus performants. En effet, il est essentiel de suivre ses variations afin de mieux comprendre son fonctionnement, son origine et son influence sur notre planète ainsi que sur les technologies qui en dépendent. C'est pour répondre à cet objectif que la mission Swarm a été développée. Composée de trois satellites, elle permet de mesurer avec une très grande précision le champ magnétique terrestre et de recueillir des données essentielles à son étude.



Simulations du champ magnétique terrestre entre deux inversions (à gauche) et pendant l'inversion (à droite). © NASA

De nombreux satellites furent envoyés dans l'espace afin de la mesurer : Magsat (USA) en 1980, Oersted (Danemark) en 1999, Champ (Allemagne) en 2010 et Swarm (ESA) le 22 novembre 2013. Ces satellites ont été lancés depuis la Russie pour un budget total de 350 millions d'euros. Deux des trois satellites sont placés à la même altitude (460 km) et à une inclinaison de 87,35° tandis que le troisième fut placé à une altitude plus élevée (530 km) et à une inclinaison de 87,95°, leurs orbites étant régulièrement optimisées afin de pouvoir mieux identifier les différentes sources du champ magnétique terrestre. Chacun de ces trois satellites est équipé d'un accéléromètre et d'un instrument de mesure du champ électrique, comparable à une boussole en trois dimensions qui nous fournissent des mesures précises sur l'intensité et la direction du champ magnétique, donnant ainsi plus d'informations sur l'ionosphère. Ces appareils sont situés à l'intérieur du satellite tandis que le capteur est placé le plus loin possible du satellite sur un bras robotique afin de ne pas fausser les mesures. Les satellites Swarm sont de forme trapézoïdale ce qui permet de résoudre plusieurs problèmes : la réduction de la trainée à basse altitude, la miniaturisation de la charge utile ou encore les exigences de propreté magnétique. Swarm a pour objectif l'étude du champ magnétique et de l'environnement ionosphérique terrestre ainsi que du mécanisme de dynamo dans le noyau terrestre, sa dynamique et sa façon d'interagir avec le manteau, les différentes sources aimantées du champ magnétique lithosphérique, les fluctuations de la conductivité électrique du manteau, les courants électriques circulant dans l'ionosphère et la magnétosphère ainsi que l'influence du soleil sur ces derniers, le rôle du champ magnétique et des couplages entre l'ionosphère et la magnétosphère pour l'apport d'énergie dans la thermosphère mais également le signal magnétique produit par les marées et les courants océaniques. En résumé, la mesure du magnétisme terrestre n'est pas une pratique récente mais qui reste toujours très usitée dans le domaine de l'orientation spatiale.



La constellation Swarm © ESA

Elioth Dupont, Chahine Yelles Chahouche et Claire Yu

Le saviez-vous ?





LES AURORES BOREALES EN QUESTIONS



Le voile scintillant des aurores boréales © Omar Sahel



Qu'est-ce qu'une aurore boréale ?

Avez-vous déjà observé un ballet inexplicable de couleurs dans le ciel de nuit ? Ces magnifiques couleurs composant les aurores polaires surviennent aux pôles Nord et Sud. Une aurore boréale est un phénomène lumineux coloré survenant dans le ciel autour du pôle magnétique Nord. Elle est due au choc entre des particules émises par le Soleil et l'atmosphère terrestre. La majorité des aurores boréales se produit entre 80 et 300 kilomètres d'altitude. Au pôle magnétique Sud, on parle d'aurores australes. Plus généralement, on désigne ces aurores comme « polaires ».

Qu'est- ce qui cause les aurores boréales ?

Le flot constant de traînées de particules chargées libérées par le Soleil – ce que l'on appelle le vent solaire – est à la source des aurores boréales. Quand ces particules se rapprochent de la Terre, le champ magnétique terrestre les attire et les entraîne vers les pôles. Quand ces particules solaires entrent en collision avec l'atmosphère, elles libèrent de l'énergie sous forme de lumière et l'aurore apparaît.

Pourquoi est-ce si spécial ?

Le champ magnétique du Soleil pivote environ tous les 11 ans. Au milieu de ce cycle, l'activité solaire augmente, un plus grand nombre de particules chargées est ainsi libéré. Plus il y a de particules et plus il y a de chances de voir naître des aurores polaires. Comme le Soleil se trouve actuellement autour du maximum de son cycle d'activité, les chances actuelles d'observer des aurores boréales sont importantes.



Pourquoi toutes ces couleurs ?

Dans ce ballet de couleurs vertes, roses et rouges, chacune raconte une histoire sur ce qui se passe dans l'atmosphère terrestre. Les gaz de l'atmosphère et l'altitude de la collision avec les particules sont deux facteurs ayant un effet sur la couleur des aurores boréales. Les particules du vent solaire entrant en collision avec des atomes d'oxygène dans l'atmosphère entre 300 et 400 km au-dessus de la planète créent des aurores rouges. Les vertes, plus fréquentes, se produisent également lorsque les particules solaires chargées rencontrent de l'oxygène, mais à des altitudes comprises entre 100 et 300 km. Généralement observées sur les bords inférieurs de l'aurore, les couleurs roses et les rouges foncés sont dues aux collisions entre le vent solaire et les particules d'azote. Ces couleurs surviennent moins haut dans l'atmosphère, soit à environ 100 km. Les plus rares, les bleues et violettes, apparaissent lorsque le vent solaire rencontre de l'azote à moins de 100 km.

Louis Carayrol, Nataniel Llano Martinez et Marie Pizana

IGOSAT, UN PETIT DANS LA COURS DES GRANDS



Vue d'artiste humouristique générée par OpenAI

Papas et Mamans

Comme tous les bébés, IGOSat n'a pas émergé tout seul. Né en 2013, ce petit satellite a pu se développer grâce à une grande famille composée de chercheurs, d'ingénieurs, d'enseignants et de centaines d'étudiants. Chacun lui a apporté quelque chose : certains lui ont construit son « squelette », d'autres lui ont donné son « cerveau » en programmant ses systèmes, tandis que d'autres l'ont testé et préparé à affronter le grand monde... enfin, l'espace !

Ses principaux « parents » sont Hubert Halloin, coordinateur du projet, Philippe Laurent, Pierdavide Coïsson et Sébastien Durand. Mais ils sont loin d'avoir été seuls. De nombreux chercheurs, ingénieurs et enseignants du CNRS, du CEA, d'Université Paris Cité et de l'IPGP ont eux aussi veillé sur lui pendant toute sa croissance.


IGOSat pendant les campagnes de test
© Pôle spatial Université Paris Cité / Audrey Le Reun

IGOSat est aussi un véritable bébé de l'université. Depuis sa naissance, plus de 300 étudiants ont participé à son développement. Chaque année, une nouvelle génération rejoint l'aventure. Ils lui fabriquent de nouvelles pièces, programment ses systèmes, assemblent son corps et vérifient que tout fonctionne parfaitement avant son grand départ. On peut dire qu'à chaque promotion, IGOSat grandit un peu plus.

Pour bien évoluer, il lui fallait aussi de quoi se nourrir. Son « biberon » est rempli

grâce au soutien du CNES, principal financeur du projet, mais aussi du LabEx UnivEarthS et d'Université Paris Cité, qui financent les recherches, le matériel, les logiciels et les stages. Sans eux, notre petit satellite aurait eu bien du mal à grandir.

Aujourd'hui, IGOSat est enfin prêt à quitter le nid. Après des années à être choyé dans les laboratoires, il va prendre son envol vers l'espace, où il pourra accomplir la mission pour laquelle toute sa grande famille l'a préparé.

Son organisme

Comme tout bébé bien conçu, IGOSat est composé de plusieurs organes, chacun ayant un rôle essentiel pour le faire vivre et fonctionner correctement dans l'espace.

Son premier organe est le scintillateur, associé à l'ASIC EASIROC. C'est lui qui agit comme ses yeux scientifiques, chargé de détecter les particules. Pour améliorer la qualité de ses observations, il est accompagné d'une carte de traitement des données et protégé par un blindage en tantale, qui joue le rôle d'un bouclier contre les bruits parasites venant de l'arrière du détecteur. Pour communiquer avec ses parents restés sur Terre, IGOSat utilise sa carte TRXVU. Elle est dédiée aux télécommunications : elle reçoit les commandes envoyées depuis la station au sol et transmet les données qu'il a récoltées. Grâce à ses antennes déployables, elle lui permet de rester en contact permanent avec sa famille terrestre.

Au centre de tout, il y a son cerveau : l'ordinateur de bord, appelé OBC. C'est lui qui contrôle tous les autres organes, exécute le logiciel de vol et gère les données scientifiques. Sans lui, IGOSat ne pourrait ni réfléchir ni organiser ses observations. Pour rester bien orienté dans l'espace, il dispose aussi d'un système de contrôle d'attitude appelé ADCS. Il fonctionne grâce à plusieurs capteurs comme une centrale inertielle et un gyroscope, ainsi qu'à des actionneurs comme les magnéto-coupleurs. Cet ensemble lui permet de savoir dans quelle direction il regarde et de corriger sa position en permanence.

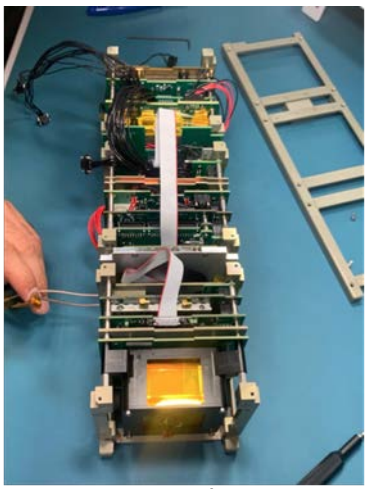
Comme tout être vivant, IGOSat a aussi besoin d'énergie pour grandir et fonctionner. Sa carte batterie, composée de quatre batteries, surveille leur charge et leur température afin de garantir leur bon état de santé tout au long de la mission. Son énergie principale vient de son système d'alimentation électrique, appelé EPS. Il est composé de quatre panneaux solaires qui lui permettent de produire, convertir et distribuer l'électricité nécessaire à tous ses organes. Ce système assure aussi sa passivation en fin de mission, afin de limiter les risques de débris spatiaux et de protéger l'environnement orbital.

Enfin, IGOSat possède un système de positionnement très précis : son GPS bi-fréquence, composé d'un récepteur NovAtel OEM719 et d'une antenne Tallysman TW3870E. Grâce à lui, il peut savoir exactement où il se trouve et à quelle vitesse il se déplace autour de la Terre.

Objectifs de vie

Les parents d'IGOSat lui ont préparé une carrière très prometteuse. Une fois devenu assez grand, il sera envoyé en orbite terrestre pour accomplir sa mission scientifique. Son premier objectif sera de mesurer le contenu électronique total (TEC) de l'ionosphère. Grâce à cela, il pourra aider les chercheurs à mieux comprendre les perturbations de cette couche de l'atmosphère, qui influencent directement la propagation des ondes

radio autour de la Terre. En d'autres termes, IGOSat contribuera à améliorer la fiabilité des communications et des systèmes de navigation. Mais ce n'est pas tout. Le petit satellite aura aussi pour mission d'observer des particules beaucoup plus énergétiques. Il mesurera les électrons de haute énergie ainsi que les rayons gamma, afin d'étudier les phénomènes liés à la météorologie spatiale. Ces observations permettront de mieux comprendre les conditions extrêmes dans lesquelles évoluent les satellites et les équipements en orbite.


IGOSat en cours de conception
© Université Paris Cité

Au-delà de ses missions scientifiques, IGOSat porte aussi une grande valeur humaine et pédagogique. Sa naissance et son développement ont permis à des centaines d'étudiants de participer à un véritable projet spatial, en contribuant concrètement à sa conception, sa fabrication et ses tests.

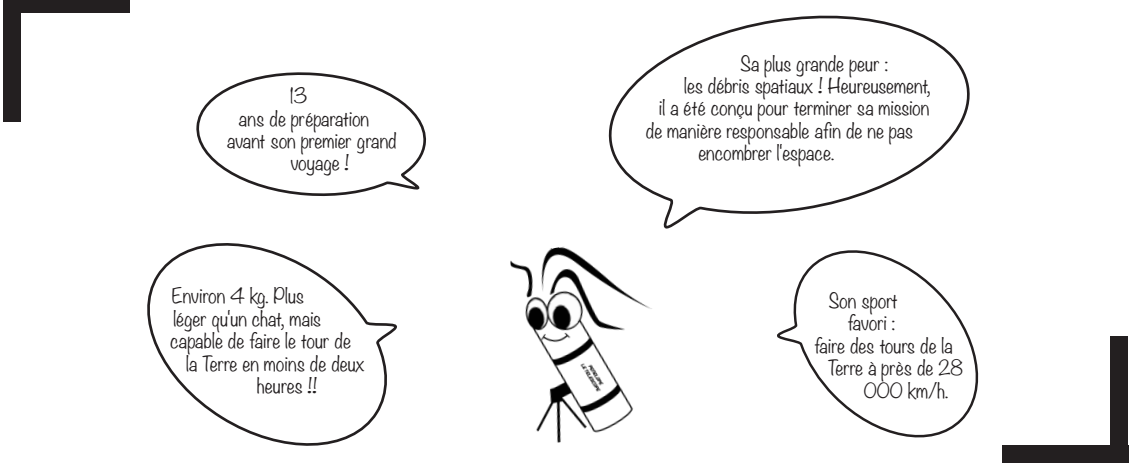
Ainsi, une fois dans l'espace, IGOSat pourra non seulement remplir ses objectifs scientifiques, mais aussi rendre fiers tous ceux qui l'ont accompagné depuis ses premiers jours, en participant à l'avancée des connaissances dans le domaine spatial.

Pour Conclure

IGOSat est bien plus qu'un simple satellite. C'est un petit " bébé spatial " qui a grandi patiemment grâce à l'attention de ses chercheurs, ingénieurs et étudiants. Chacun a contribué à son développement, en lui apportant un peu de savoir, de technique et beaucoup de travail collectif.

Aujourd'hui, une fois prêt à quitter la Terre, IGOSat représente à la fois une mission scientifique ambitieuse et une aventure humaine unique. En orbite, il continuera de grandir autrement, en transmettant des données précieuses sur l'ionosphère et la météorologie spatiale. Mais surtout, il restera le résultat d'une grande famille réunie autour d'un même objectif : faire naître et accompagner un véritable projet spatial. Et dans ce rôle, IGOSat pourra enfin montrer qu'il a bien grandi.

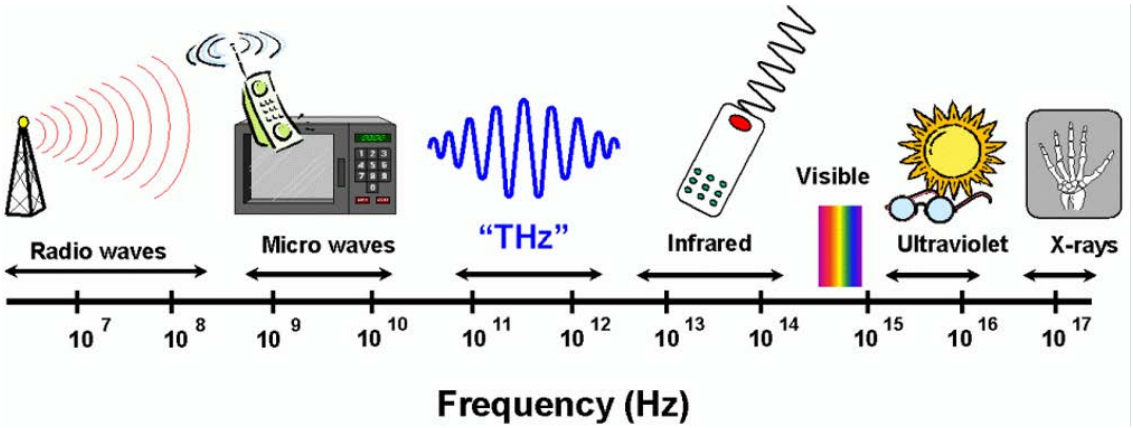
Côme Beyssac, Louis Carayrol, Sacha Emmel, Nataniel Llano Martinez et Timothé Le Hénaff



LE TERAHERTZ

Une onde transformée en technologie innovante !

Le domaine des fréquences électromagnétiques cache encore des trésors inexploités, et parmi eux se trouvent celui des ondes térahertz (THz). Situées sur le spectre entre les micro-ondes (utilisées pour nos téléphones) et les rayons infrarouges (la chaleur), les ondes térahertz possèdent des propriétés physiques uniques qui révolutionnent la science.



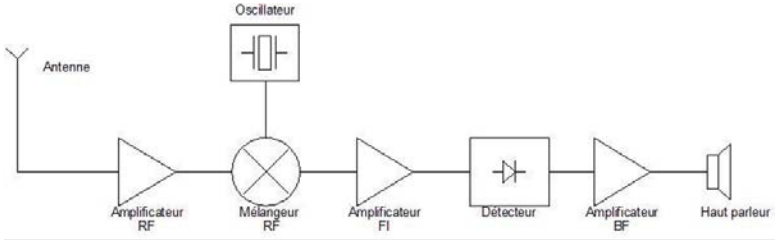
© Ruyan Deng

D'abord, elles possèdent une résolution millimétrique, ce qui permet d'obtenir des images d'une netteté exceptionnelle à une échelle très petite. De plus, ces ondes « voient » à travers la matière : elles traversent facilement les vêtements, le plastique, le carton ou le bois, mais s'arrêtent net face aux métaux et à l'eau. En effet, elles détectent l'eau avec une sensibilité extrême, car les molécules H_2O absorbent fortement cette fréquence. En analysant la manière dont l'onde traverse un corps, il est possible d'identifier précisément les matières en révélant leur signature spectrale (leur carte d'identité chimique). Enfin, le plus grand atout des ondes térahertz est qu'elles sont non ionisantes. Contrairement aux rayons X, leur énergie est trop faible pour arracher des électrons aux atomes ou endommager l'ADN, ce qui les rend totalement inoffensives pour la santé humaine.

Sur Terre, ces capacités ouvrent la voie à des applications spectaculaires. Dans l'industrie, elles permettent le contrôle non destructif de la qualité des produits (détecter une bulle d'air dans une pièce automobile ou vérifier l'homogénéité d'un médicament en pharmacie). Dans le domaine de la défense et de la sécurité, elles servent à fouiller les bagages et détecter des menaces cachées (armes, drogues, explosifs) sous les vêtements dans les aéroports. Elles permettent également l'analyse à distance, comme le tri automatisé des déchets ou l'étude de peintures historiques sans toucher aux œuvres d'art. En biologie et en médecine, elles aident en oncologie à délimiter très précisément les contours d'une tumeur en distinguant les tissus sains des tissus cancéreux grâce à leur différence d'hydratation. Enfin, elles représentent le pilier des futures télécommunications 6G, promettant des débits de données ultra-rapides à courte portée (moins de 100 mètres).

Mais le térahertz est aussi une fenêtre extraordinaire sur l'espace. En observant le cosmos dans ces fréquences, les astrophysiciens peuvent percer les secrets des étoiles puisqu'elles traversent les nuages moléculaires froids et permettent d'observer la naissance des astres, analyser la chimie interstellaire en identifiant plus de 140 molécules complexes dans le vide spatial, dont des briques essentielles à la vie, traquer l'eau dans l'Univers en étudiant la vapeur d'eau des comètes et des planètes pour comprendre la

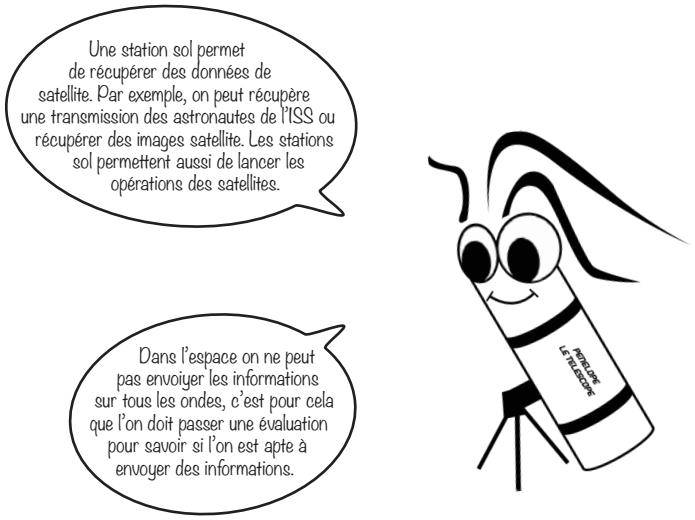
provenance de l'eau de notre propre Système solaire, cartographier le carbone en suivant les échanges d'énergie qui façonnent les galaxies grâce à l'observation du carbone ionisé, remonter le temps en captant les signaux des premières galaxies nées au début de l'Univers, malgré leur distance immense.



Emetteur récepteur hétérodyne – Electronique radiomateur

Pour capter ces signaux cosmiques extrêmement faibles, les scientifiques utilisent le principe de la détection hétérodyne. Les ondes de très haute fréquence reçues de l'espace sont impossibles à traiter directement par l'électronique classique. On utilise donc un composant qui mélange ce signal céleste avec un signal de fréquence très proche généré localement. Par un phénomène d'interférence, le mélange produit une onde de fréquence beaucoup plus basse mais qui conserve intactes toutes les informations du signal d'origine. C'est cette onde simplifiée que l'on va ensuite filtrer, amplifier et analyser pour mesurer et cartographier les faisceaux spatiaux sous forme de cartes d'intensité ou de spectres chimiques. En conclusion, l'onde térahertz abolit les frontières entre l'infiniment petit médical et l'infiniment grand spatial.

Edwige Benanteur



Elioth Dupont

SISMOLOGIE

Vers la fin du XIXe siècle se développe la sismologie moderne grâce à l'apparition des premiers véritables sismographes. Ces appareils mesurent les ondes sismiques, c'est-à-dire les vibrations du sol due aux séismes, et les matérialisent en un tracé.

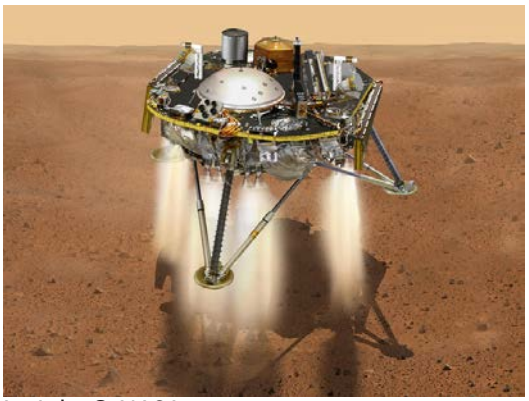
Un **sismomètre** est un appareil extrêmement sensible aux vibrations, qui repose sur le principe du pendule : une masse lourde et inerte (qui par son poids présentera une certaine résistance ou inertie au mouvement) est reliée à un bâti par une suspension ou un ressort qui permet un mouvement. Lorsqu'une secousse se produit, la masselotte, excitée par l'énergie reçue, se met à vibrer et forme un tracé sur le sismographe. L'étude de ces secousses, la sismologie, nous a permis de mieux comprendre la composition interne de la Terre, qui nous est physiquement inaccessible. En effet, les ondes sismiques comportent des informations sur les milieux qu'elles traversent, et on peut déduire par triangulation leur lieu d'origine à l'intérieur de la Terre. On a donc pu établir l'existence des plaques tectoniques et de leurs mouvements continus, mais l'on a aussi découvert les couches internes de la Terre : la croute, le manteau, et le noyau.



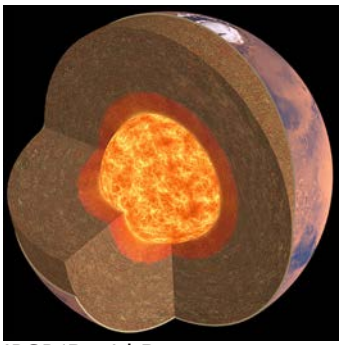
Depuis le début de la conquête spatiale, la sismologie a pu être appliquée aux autres corps du système solaire, nous permettant de mieux comprendre leurs compositions mais aussi leurs origines.

MISSION INSIGHT

Lancé par la NASA en mai 2018, l'atterisseur InSight s'est posé sur Mars en novembre 2018. Contrairement aux rovers qui sont capables de se déplacer, InSight était une station fixe. Son but principal était d'étudier l'intérieur profond de la planète rouge pour comprendre comment se forment les planètes rocheuses. Après avoir récolté des données précieuses, la mission s'est arrêtée en décembre 2022 car ses panneaux solaires étaient couverts de poussière.


Insight © NASA

Le succès d'InSight repose sur son instrument principal : le sismomètre SEIS. Cet appareil ultra-sensible a été développé sous la direction du CNES. La responsabilité scientifique de l'instrument a été confiée à l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP), qui a collaboré avec d'autres laboratoires à l'international. SEIS était assez précis pour détecter des vibrations du sol plus petites qu'un atome. Toutes les données étaient envoyées et directement analysées par les équipes scientifiques basées à Toulouse.


IPGP/David Ducros

En quatre ans, SEIS a enregistré plus de 1300 séismes martiens, ainsi que des vibrations provoquées par des chutes de météorites. En analysant la façon dont ces ondes se déplacent dans le sol, les scientifiques ont pu en déduire la composition interne de Mars. La croute est plus mince que l'on pensait, entre 20 et 40 kilomètres d'épaisseur, et divisée en plusieurs couches

distinctes. Le manteau très épais n'est pas actif comme celui de la Terre, car Mars n'a pas de tectonique des plaques. Le noyau est composé de fer liquide et mesure environ 1650 kilomètres de rayon.

Grâce à cette mission, nous pouvons aujourd'hui comparer l'intérieur de la Terre et celui de Mars. Cela ouvre la voie à de futures missions, notamment pour étudier les tremblements de Titan et Europe, mais aussi de la Lune.

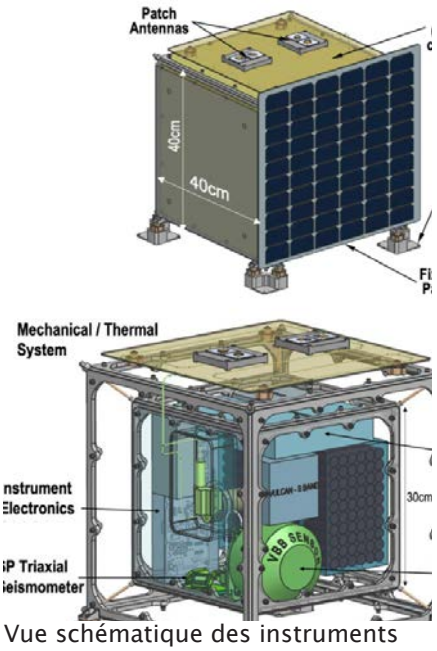
FARSIDE SEISMIC SUITE

Près de 50 ans après les missions Apollo, la sismologie s'apprête à faire son grand retour sur la Lune. Le projet Farside Seismic Suite (FSS), sélectionné par la NASA, prévoit d'envoyer un boîtier autonome se poser dans le cratère Schrödinger. Sa particularité est que, pour la toute première fois de l'histoire, un sismomètre écoutera les séismes sur la face cachée de la Lune, près du pôle Sud. L'objectif est de comprendre pourquoi et comment la Lune vibre, notamment à cause de son refroidissement ou des impacts de météorites.



Cette mission est dirigée par le Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA, mais l'instrument principal est de conception française. Le CNES et l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) ont fourni le capteur le plus important : le sismomètre VBB.

Pour économiser du temps et de l'argent, les équipes françaises ont utilisé le modèle de rechange qui avait été fabriqué pour la mission martienne InSight. FSS forme un cube de 40 cm de côté qui possède sa propre batterie et ses propres panneaux solaires. Cela lui permettra de continuer à enregistrer des données pendant plusieurs mois, même après l'extinction complète de l'atterrisseur qui l'aura déposé, évitant ainsi toute vibration parasite.



Vue schématique des instruments de FSS © NASA/JPL/IPGP/Kinemetrics/Oxford University/Imperial College

Bien que le lancement soit encore à venir, les scientifiques espèrent répondre à de grandes questions. FSS permettra de découvrir si la face cachée de la Lune vibre différemment de la face visible, qui avait été étudiée lors des missions Apollo, de mesurer la fréquence à laquelle des micrométéorites frappent le pôle Sud de la Lune, mais aussi de mieux comprendre l'épaisseur de la croûte lunaire sous un très ancien volcan. Cette mission marque une nouvelle étape historique pour les agences internationales dans la compréhension du Système solaire.

Alexie Lebois, Marie Pizana et Pietro Rossi

PERSEVERANCE

L'histoire des missions martiennes : Du fantasme au grand froid

Avant l'ère spatiale, l'astronome Percival Lowell croyait observer au télescope des canaux, construits par une civilisation martienne intelligente, une illusion d'optique démentie par la suite.



Première image en couleurs de Viking 1 © NASA/JPL

Dès la guerre froide, Mars devient un terrain d'affrontement technologique entre les États-Unis et l'URSS. Plus de la moitié des premières tentatives échouent, faisant de Mars le « cimetière des sondes spatiales ». La première réussite revient à la NASA en 1965 avec Mariner 4, qui survole la planète et révèle une surface désertique et cratérisée.

Le tournant a lieu en 1975 avec les sondes américaines Viking 1 et Viking 2, orbiteur et atterrisseur, qui se posent en 1976. Leurs mini-laboratoires cherchent des traces de vie, mais les résultats sont négatifs ou ambigus. Ainsi, Mars apparaît comme un désert gelé, stérile et radioactif. Cette déception, et les coûts massifs, arrêtent l'exploration pendant vingt ans.



Sojourner proche de « The Dice » © NASA

En 1993, la NASA tente un retour avec Mars Observer, mais la sonde subit une panne fatale juste avant son arrivée. Le vrai renouveau arrive, grâce à la stratégie du « Faster, Better, Cheaper » de la NASA, en 1997 avec Mars Pathfinder et son robot Sojourner, le premier engin mobile de l'histoire à rouler sur une autre planète.



Vue d'artiste de Curiosity © NASA/JPL-Caltech

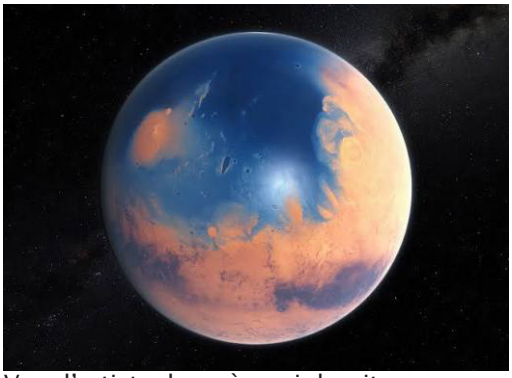
Dans les années 2000, les agences s'installent durablement sur Mars. En orbite, l'Europe, grâce à l'Agence spatiale européenne (ESA), réussit sa première mission en 2003 avec Mars Express, rejointe en 2006 par le puissant satellite cartographe MRO de la NASA. Au sol, en 2004, les robots géologues Spirit et Opportunity découvrent les premières preuves minérales indiscutables de la présence passée d'eau liquide.Cette lignée culmine en août 2012 avec Curiosity. Ce laboratoire mobile d'une tonne, alimenté par énergie nucléaire, explore le cratère Gale depuis plus de dix ans. Ses analyses chimiques prouvent que Mars a un jour réuni toutes les conditions nécessaires à l'apparition d'une vie microbienne, avec de l'eau liquide douce et des briques chimiques essentielles.

Les enjeux de Mars : une ancienne jumelle de la Terre

Il y a 4 milliards d'années, Mars ressemblait de façon frappante à la Terre primitive. Les données de la NASA et du CNRS prouvent qu'elle possédait alors une atmosphère épaisse, un champ magnétique et de l'eau liquide stable, avec la présence de rivières et de lacs. C'est précisément à cette époque que la vie est apparue sur Terre. L'enjeu principal est donc de découvrir si la vie a également pu éclore sur Mars. Contrairement

à la Terre qui renouvelle ses roches en permanence, Mars s'est « éteinte » très tôt et sa surface est restée figée.

Explorer Mars aujourd'hui fonctionne donc comme une machine à remonter le temps puisque cela permet d'étudier des roches intactes datant du moment où la vie faisait ses premiers pas dans le Système solaire, et de comprendre comment la vie a été créée.



Vue d'artiste de ce à quoi devait ressembler Mars il y a quatre milliards d'années
© ESO/M. Kornmesser/N. Risinger

La campagne « Mars Sample Return » : Le défi d'une décennie

Pour franchir une nouvelle étape scientifique, la simple analyse in situ, c'est-à-dire sur place, par des robots, ne suffit plus. Les agences spatiales ont donc mis sur pied la campagne Mars Sample Return (MSR). Menée conjointement par la NASA et l'ESA, c'est l'une des initiatives robotiques les plus ambitieuses et les plus complexes de l'histoire de l'exploration spatiale.

Ramener des morceaux de roche d'une autre planète à l'autre bout du Système solaire est un défi si immense qu'il a été découpé en une trilogie de trois sous-missions distinctes. La première, la collecte consiste en un rover, Persévérance de la NASA, destiné à forer le sol martien depuis 2021 pour sceller des échantillons de roche dans de petits tubes métalliques étanches, déposés ensuite à la surface ou conservés à son bord.
La deuxième a pour objectif la récupération et le décollage via un atterrisseur, le Sample Retrieval Lander. Ce dernier devra se poser sur Mars pour récupérer ces tubes. Ils seront chargés dans une mini-fusée de deux mètres de haut, le Mars Ascent Vehicle. Ce véhicule réalisera une grande première historique : décoller depuis le sol d'une autre planète pour se placer en orbite martienne Et enfin la troisième prévoit le retour sur Terre des échantillons. Un immense satellite européen en orbite autour de Mars, l'Earth Return Orbiter, conçu par l'ESA, aura pour rôle de repérer et capturer la capsule d'échantillons en plein vol, puis d'allumer ses moteurs pour reprendre la direction de la Terre.

Tensions politiques, coûts et défis techniques

MSR est au cœur d'intenses débats géopolitiques et budgétaires. L'accord repose sur un partage strict : la NASA finance les engins de surface et la mini-fusée, tandis que l'ESA, avec le soutien du CNES en France, prend en charge le satellite de retour et le bras robotique de transfert. Cependant, les défis techniques sont immenses. Concevoir une fusée autonome capable de décoller dans le froid martien et sécuriser une capsule hermétique pour éviter toute contamination de la Terre se révèle extrêmement complexe. Ces difficultés ont fait exploser le budget de la NASA, qui risquait de passer de 4 à 11 milliards de dollars, repoussant la mission à 2040. Face à cette dérive, le congrès américain est intervenu pour exiger un gel ou une baisse des crédits. Pour sauver le projet, la NASA et l'ESA réévaluent l'architecture de la mission. Les discussions actuelles cherchent à simplifier les technologies ou à intégrer des partenaires privés pour ramener les échantillons plus vite et à un coût acceptable pour les états.

La mission Perseverance : un laboratoire roulant en quête de vie

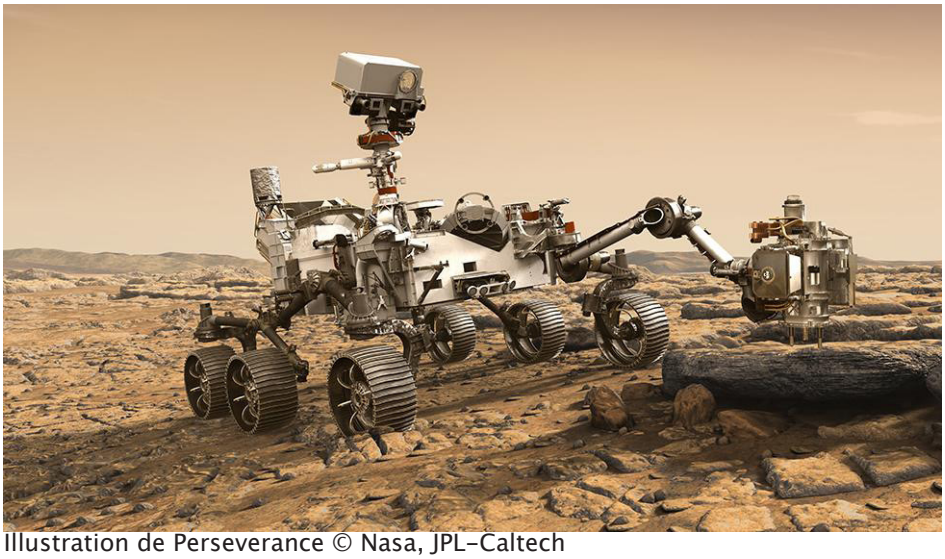


Illustration de Perseverance © Nasa, JPL-Caltech

Lancé le 30 juillet 2020, le rover Perseverance, de la mission Mars 2020 de la NASA, d'un coût de 2,44 milliards de dollars, est actuellement sur Mars depuis le 18 février 2021. De la taille d'un SUV pour une masse d'une tonne, il explore le cratère Jezero. Ce bassin d'impact de 45 kilomètres de large a été choisi parce qu'il abritait un système lac-delta il y a 3,5 milliards d'années. Cet environnement est idéal au dépôt des sédiments, notamment des carbonates, qui capturent d'éventuelles traces de vie biologique.

Bien que Perseverance reprend l'architecture globale de Curiosity, sa charge utile, qui représente moins de 7 % de sa masse totale, est bien plus avancée, et a de nombreux objectifs. Les premiers concernent la recherche de biosignatures, c'est à dire d'indices de vie microbienne passée, avec des molécules organiques, des sédiments ou des carbonates fossilisés. Les deuxièmes sont de l'ordre de l'échantillonnage : l'extraction par bras robotique de carottes rocheuses scellées en tubes titane, et destinés à être ramenés par la mission MSR. Les troisièmes testent des technologies d'avenir. En d'autres termes, le rover essaie différentes technologies pour les prochaines campagnes d'exploration, avec la production d'oxygène à partir du CO_2, grâce à MOXIE, et des vols en atmosphère mince, avec Ingenuity.

SuperCam : Le « couteau suisse » de conception française

Placé au sommet du mât du rover, SuperCam est l'instrument le plus lourd de la charge utile. Véritable prouesse technologique, il a mobilisé en France 14 laboratoires, plus de 25 partenaires industriels et 300 personnes sous la maîtrise d'ouvrage du CNES et du CNRS. L'IRAP à Toulouse a conçu l'instrument et assuré le développement de sa partie supérieure.

SuperCam regroupe à lui seul cinq techniques d'analyse distinctes pour étudier les roches sans que le rover n'ait besoin de se déplacer : la spectrographie LIBS, un laser infrarouge qui pulvérise la roche jusqu'à 7 m, avec l'analyse du plasma révélant


Illustration de Perseverance
© NASA/JPL-Caltech

sa composition chimique ; la spectrographie Raman, laser vert identifiant la structure des minéraux et détectant les molécules organiques, ce qui est une première sur Mars ; la spectrographie infrarouge, conçu par LESIA (désormais LIRA sur le site Meudon de l'Observatoire de Paris), qui analyse la lumière solaire réfléchie pour identifier les sédiments, argiles, sulfates, jusqu'à l'horizon ; un imageur couleur haute résolution, développé par le CNES, analysant le contexte géologique et visuel exact des cibles visées par les lasers ; un microphone scientifique, conçu par ISAE-SUPAERO, qui enregistre les sons de Mars et le son du laser pour mesurer la dureté de la roche.

Le pilotage de SuperCam se fait en alternance hebdomadaire entre le centre FOCSE basé au CNES à Toulouse et le laboratoire américain du LANL au Nouveau-Mexique.

Futur de la mission : où en est le retour sur Terre ?

Le succès scientifique global de Perseverance dépend entièrement de la réussite des deux étapes suivantes de la campagne MSR. Actuellement, les deux sous-missions sont en phase active de réévaluation et de développement. Le développement de l'orbiteur européen ERO, sous responsabilité de l'ESA, se poursuit. Il s'agit d'un des piliers majeurs de la contribution européenne à la mission. Concernant l'atterrisseur et la mini-fusée MAV, face aux contraintes budgétaires imposées par le Congrès américain, la NASA retravaille l'architecture de son engin de surface. L'objectif est de simplifier la technologie de décollage depuis Mars pour réduire les coûts et assurer un retour au cours de la décennie 2030.

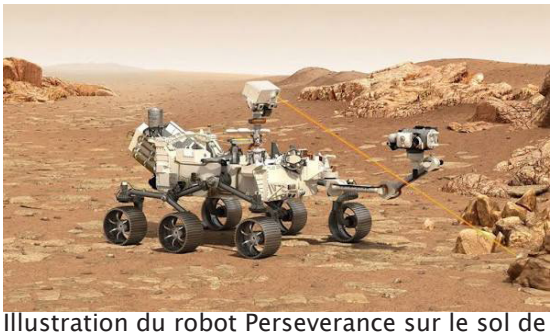


Illustration du robot Perseverance sur le sol de Mars © CNES-Davis Ducros

En attendant que ces technologies de récupération voient le jour, Perseverance continue de mettre ses précieux échantillons à l'abri dans le cratère Jezero, scellant le premier chapitre d'une aventure spatiale historique.

Sacha Emmel, Alexis Lebois et Nataniel Llano Martinez

LA MEDECINE SPATIALE

« La médecine voit l'homme dans sa totalité, comme un système complexe régi par les lois de la nature » - Albert Einstein

Si vous tombez sur cet article, c'est que vous devez sûrement vous intéresser au secdteur spatial. Peut-être même que certains d'entre vous aimeraient devenir astronaute, inspirés par les maintes missions qui ont marqué l'histoire ! Mais derrière ces exploits se cache une réalité très complexe. En effet, les astronautes suivent une préparation intense, pour la simple raison que le corps humain n'est pas fait pour aller dans l'espace. Vous en aviez sans doute entendu parler, mais les situations sur Terre et dans l'espace diffèrent. Depuis des milliers d'années, notre corps a été conditionné pour vivre avec la gravité. Mais dans l'espace, la sensation de poids habituelle s'amenuise, laissant place à l'impesanteur. Ce déconditionnement crée de nombreux troubles au niveau de notre organisme, et c'est dans ce cadre que la médecine spatiale intervient, en étudiant ses effets et en développant des contres-mesures afin de protéger la vie des astronautes.

Un système pas si fonctionnel que ça

On dit souvent que l'on se rend compte de l'importance des choses quand on les perd, et ce dicton est particulièrement vrai pour une capacité dont on a besoin chaque jour : l'équilibre. Tenir debout, marcher dans la rue... sans notre équilibre, ce serait impossible ! Mais derrière ces simples actions se cachent des organes très complexes : nos oreilles internes. Situées au plus profond de notre crâne, juste derrière le tympan, et composées de trois canaux semi-circulaires ainsi que de deux petites poches appelées l'utricule et le saccule, les oreilles internes agissent comme un véritable niveau à bulle biologique. À l'intérieur de ces cavités, un liquide bouge à chacun de nos mouvements, déplaçant de minuscules flèches microscopiques (les cellules ciliées) qui envoient des signaux électriques instantanés à notre cerveau pour l'informer de la position de notre tête.

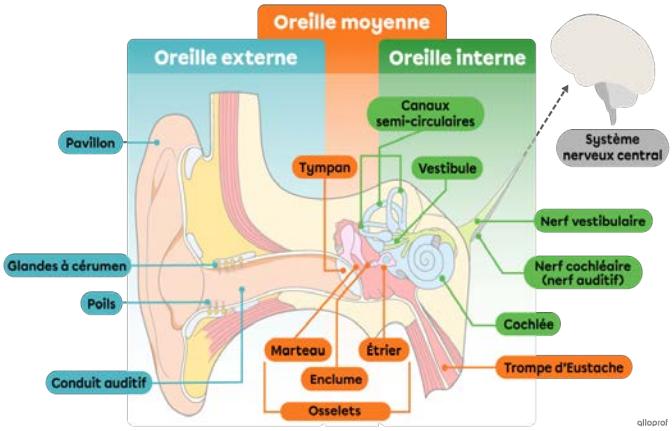


Schéma de l'oreille interne © Aparna Arasaratnam

Pour que cela fonctionne correctement, il faut de la gravité. En effet, dans l'utricule et le saccule se trouvent de petits cristaux de carbonate de calcium, les otolithes. Sur Terre, la gravité tire ces cristaux vers le bas, ce qui permet à notre cerveau de distinguer très clairement le haut du bas, y compris les yeux fermés. Or, dans la Station spatiale internationale (ISS), les astronautes sont en situation de micropesanteur. Sans force de gravité pour attirer les otolithes vers le bas, les cristaux flottent et leurs oreilles internes en sont totalement perturbées. Le système vestibulaire n'envoie plus aucune information

cohérente et transmet même des signaux qui contredisent les informations visuelles perçues par les astronautes. C'est ce conflit sensoriel qui provoque le fameux « mal de l'espace » durant les premiers jours en orbite. Heureusement, le cerveau humain est d'une plasticité remarquable : au bout d'une dizaine d'heures, il apprend à ignorer les signaux devenus inapropriés de l'oreille interne pour se fier uniquement à la vue. Une formidable adaptation qui prouve que, même face à l'absence de repères terrestres, notre corps sait trouver un nouvel équilibre.

Il est important de noter que la gravité, en plus de nous garder en équilibre, est également responsable de nombreuses fonctions essentielles du corps humain. Elle influence notamment la circulation sanguine : sur la Terre, la gravité attire les fluides vers le bas, obligeant le cœur à pomper plus fort pour irriguer le cerveau. En apesanteur, au contraire, le sang remonte vers le haut du corps. La gravité solliscite en permanence nos muscles, qui travaillent continuellement par exemple pour nous permettre de tenir debout, et participe au maintien de la densité osseuse. Privés de la contrainte exercée par le poids corps, les os n'ont plus besoin d'être aussi solides et perdent leur calcium. Elle contribue aussi au maintien des organes dans leur position usuelle. Enfin, elle a un effet sur la respiration. Sur Terre, l'air chaud plus léger monte alors que l'air froid descend, ce qui crée une convection naturelle. Dans l'espace, cette thermorégulation de l'air n'existe pas et l'air expiré stagne autour du visage des astronautes. C'est notamment pour cela qu'il y a besoin de ventilateur !

Mais alors, vous vous demandez sans doute comment font les astronautes pour combler ce manque de gravité. La réponse est simple : grâce à une préparation intense avant le décollage ainsi qu'à une activité physique soutenue (2 heures par jour) durant leur mission ! Du fait de ce milieu extrême et exigeant, les astronautes doivent être en parfaite santé et subir de nombreux tests. Malgré cela, faire du sport et avoir une excellente hygiène de vie n'est malheureusement pas suffisant pour combattre le vide de l'espace.


Frank De Winne sur le tapis de course © ESA

Les artères sont à l'épreuve du vide. Malgré ces deux heures de sport quotidien sur des tapis de course ou des vélos stationnaires, le système cardiovasculaire des astronautes subit des modifications irréversibles. En apesanteur, la répartition du sang est profondément modifiée et la pression artérielle se redistribue d'une manière totalement artificielle. Des études scientifiques ont montré que, même avec un entraînement rigoureux, les artères des astronautes ont tendance à se rigidifier de façon précoce durant un séjour prolongé dans l'espace. Après seulement six mois, leurs parois artérielles perdent de leur élasticité, ce qui équivaudrait à un vieillissement de 10 à 20 ans sur Terre. Le sport limite la fonte musculaire, mais il ne peut pas reproduire parfaitement la pression hydrostatique permanente que la gravité exerce sur nos vaisseaux sanguins.

Le défi des radiations. Au-delà des effets de l'apesanteur sur le corps, un autre danger, invisible mais bien plus redoutable, guette les explorateurs spatiaux : les radiations. Sur Terre, nous sommes protégés par deux boucliers naturels : l'atmosphère et la magnétosphère (le champ magnétique de notre planète). Dans l'espace, y compris à l'altitude de la Station spatiale internationale, les astronautes sont exposés aux rayons cosmiques galactiques et aux tempêtes solaires. Ces particules chargées à haute énergie traversent la coque de la station et le corps humain, endommageant directement l'ADN des cellules. À long terme, cette exposition augmente considérablement les risques de

développer un cancer, des cataractes ou des maladies dégénératives. C'est aujourd'hui le principal obstacle technique pour les futures missions habitées vers Mars, car aucun blindage actuel n'est assez léger et efficace pour bloquer totalement ces rayonnements.

Un moral mis à rude épreuve

Dans l'espace, les astronautes sont coupés du monde, ressentant par ailleurs un sentiment d'exil loin de la vie sur Terre, ce qui provoque par la suite une baisse de moral. De plus, cet isolement dans un endroit confiné, entraîne de nombreuses conséquences telles que l'irritabilité ou des tensions au sein du groupe. Les exigences liées à leur profession ainsi que le déconditionnement corporel créent un stress intense, lui-même renforcé par les troubles du sommeil accumulés par une alternance rapide des levers et couchers du soleil. Tout cela impacte fortement le mental. Ajoutez à cela, des radiations qui entraînent également des troubles cognitifs pouvant mettre en danger une situation déjà précaire. Afin d'aider au mieux les astronautes à surmonter cette rude épreuve, la médecine spatiale joue un rôle essentiel. Sur Terre, les médecins préparent les astronautes à ce qui les attend, notamment grâce à des simulations d'isolement. Ces simulations permettent aux chercheurs d'étudier les comportements adoptés par les équipages, comme cela avait été le cas lors du projet Mars 500. À l'issue de cette expérience, les spécialistes ont remarqué que les interactions entre les membres de l'équipage diminuaient progressivement, souvent à cause du stress et des tensions. C'est grâce à ces observations que les médecins peuvent ainsi adapter les programmes d'accompagnement. Dans l'espace, un suivi étroit est mis en place afin d'étudier leur condition sur le long terme, et d'intervenir rapidement en cas de problème. Des programmes de soutien psychologique sont établis, notamment par des systèmes de communication avec des psychologues sur Terre dans le but de les accompagner au mieux tout au long de leur mission.

La médecine spatiale, le remède contre les dangers de l'espace

Pour assurer la sûreté des astronautes lors de voyages spatiaux, il est donc impératif d'étudier en détail ces différents effets afin de développer des contre-mesures adaptées. C'est là que la médecine spatiale entre en jeu ! Aujourd'hui, plusieurs dispositifs existent déjà pour limiter les effets de l'impesanteur sur le corps. Peut-être avez-vous déjà entendu parler du gymnase à bord de l'ISS, dans lequel les astronautes s'exercent pour limiter la perte musculaire et freiner l'ostéoporose, mais actuellement, tous les effets ne disposent pas de contre-mesures. Le retour d'un voyage spatial reste ainsi encore difficile pour les astronautes. C'est pour cela que les tests se poursuivent sur Terre, à l'aide de dispositifs expérimentaux simulant l'impesanteur au sol : l'**immersion sèche**, qui plonge un volontaire dans un bassin d'eau recouvert de tissu imperméable, et l'**alitement anti-orthostatique**, qui maintient le sujet sur un lit incliné. Afin de reproduire les conditions spatiales le plus fidèlement possible, les volontaires restent allongés tout au long de l'expérience ! Des données de référence sont ainsi relevées et de nouvelles techniques peuvent être testées, comme par exemple de nouveaux appareils de sport, des régimes, du jeûne intermittent… Ainsi que l'évolution des technologies de mesure médicale ! Avec les vols paraboliques, il est possible de faire des tests en microgravité, par exemple de prélèvements sanguins par un dispositif optimisé pour l'environnement spatial, et grâce aux données recueillies, d'améliorer nos connaissances sur les effets du déconditionnement corporel.


Samantha Cristoforetti sur le tapis de course © ESA


Étude en bedrest © MEDES


Immersion sèche © ESA

Mais la médecine spatiale s'intéresse aussi à certains facteurs extérieurs au corps. La pharmacologie, entre autres, constitue une piste d'étude particulièrement intéressante pour les voyages spatiaux. Cette discipline, qui étudie les variations des effets des médicaments, est en effet cruciale en cas de maladie au cours d'une mission spatiale ! Imaginez un futur astronaute sur Mars, à plus de 200 jours de la Terre, fiévreux et sans médicament fiable… Voilà toute l'importance de cette discipline ! Et les pistes de recherche sont nombreuses. Actuellement, les radiations perturbent par exemple l'efficacité des médicaments, tandis que la durée des futures missions pose également un problème pour leur conservation. Le développement de nouveaux médicaments résistants à ces contraintes, et peut-être d'autres capables de contrer les effets les plus néfastes du déconditionnement, constituerait alors une avancée majeure pour l'exploration spatiale. Avec les progrès de la technologie, l'étude de la médecine spatiale est donc porteuse de grands espoirs !

1, 2, 3… Vive la médecine spatiale !!!

En somme, l'aventure spatiale met en lumière à quel point le corps humain est une machine formidablement complexe, sculptée par et pour la Terre. Conquérir l'espace ne sera donc pas seulement une question de puissance de fusée, mais bien de médecine et de biologie pour réussir à protéger la vie là où elle n'a jamais été censée se développer.

Alors, toujours envie d'être astronaute ?

Edwige Benanteur, Claire Yu et Amélie Chun

A LA DECOUVERTE DES LUNES DU SYSTEME SOLAIRE



Vue de Titan
© NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute

Pendant notre voyage en réalité virtuelle, nous nous sommes posés sur Titan avec la mission Cassini-Huygens, qui avait, entre autres, pour objectif d'étudier son atmosphère. Au cours de cette mission, la sonde Cassini a également survolé Encelade et analysé les panaches de glace et de vapeur d'eau émis par ses geysers, sans toutefois rapporter d'échantillons sur Terre.

Encelade est une lune recouverte d'une couche de glace en surface, sous laquelle on suppose la présence d'un océan d'eau liquide. Équipés de casques de réalité virtuelle, nous sommes allés explorer Titan. C'est Christiaan Huygens, l'un des astronomes successeurs de Galilée, qui l'a découverte en 1655. Son nom fut donné à la sonde Huygens de l'ESA, qui atterrit sur Titan 350 ans plus tard. Son atmosphère, d'une épaisseur de 1 500 km, est en partie composée de méthane gazeux, qui forme de la suie à la surface. Titan est une lune composée de roches jaunes. Une partie de ces roches est constituée de galets polis par l'action d'un fluide, qui s'avère être du méthane liquide, étant donné qu'il y fait très froid (-180 °C). Située très loin du Soleil, Titan est très peu ensoleillée, notamment en raison de l'obstruction provoquée par son épaisse atmosphère. Il y fait donc très sombre (un million de fois moins de lumière que sur Terre). Titan connaît un cycle du méthane semblable à notre cycle de l'eau. Autrement dit, le méthane liquide se réchauffe et passe de l'état liquide à l'état gazeux, puis s'élève dans l'atmosphère. En montant, il se refroidit avant de retomber sous forme de pluie à la surface de Titan.

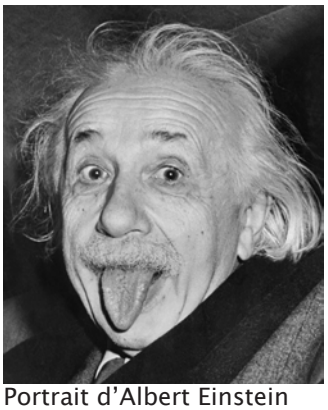


Vue d'Encelade par Cassini
© NASA/JPL/Space Science Inst.

Avec la sonde Cassini-Huygens, nous avons survolé Encelade, l'une des lunes de Saturne, composée en grande partie d'eau gelée. Il s'agit de l'une des lunes présentant le volcanisme le plus actif du Système solaire. Sous une épaisse couche de glace de 5 km se cache en réalité un océan d'eau liquide de 65 km de profondeur. Le volcanisme d'Encelade agit comme un véritable chauffe-eau naturel, maintenant la température de l'eau au-dessus de 0 °C.

Chahine Yelles-Chaouche et Elioth Dupont

LES ONDES GRAVITATIONNELLES



Portrait d'Albert Einstein
© Arthur Sasse

En faisant tomber deux objets de masses différentes, Galilée découvre que tous les corps tombent à la même vitesse. Un demi-siècle plus tard, Newton formule les lois de la gravitation universelle, selon lesquelles deux objets s'attirent proportionnellement à leur masse. Plus tard, Einstein élabore la théorie de la relativité générale, qui explique que les objets massifs déforment l'espace-temps. Cette distorsion permet l'émergence de phénomènes physiques tels que les ondes gravitationnelles, prédites par Einstein. Ce n'est qu'en 2015 que ces ondes ont été observées pour la première fois.

Lorsque deux objets très denses, comme des étoiles à neutrons ou des trous noirs, tournent très rapidement l'un autour de l'autre, leur vitesse augmente rapidement avant de fusionner. Cette accélération engendre une déformation de l'espace-temps, qui se traduit par l'émission d'ondes gravitationnelles extrêmement énergétiques, comparables à des vaguelettes à la surface d'un étang. Ces ondes compriment et allongent l'espace-temps de manière régulière sur leur passage. Cependant, leur effet s'amenuise avec la distance et elles sont ainsi extrêmement difficiles à détecter lorsqu'elles nous parviennent. La distorsion qu'elles provoquent est de l'ordre de 10^{-15} mètres sur plusieurs kilomètres, ce qui est comparable à la taille d'un noyau d'atome.

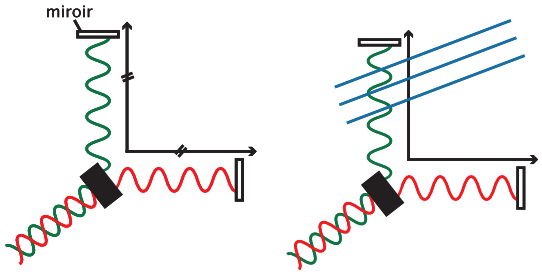
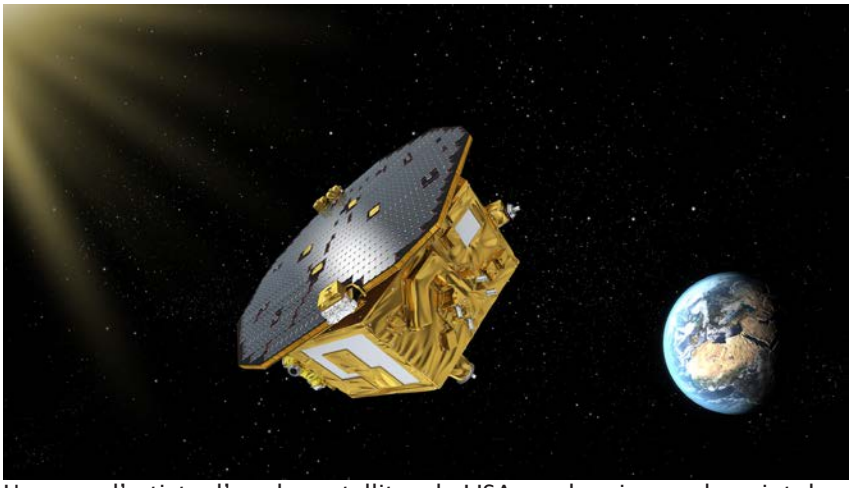


Schéma du fonctionnement de l'interférométrie. À gauche, les ondes s'annulent en sortie, aucune lumière ne sort. À droite, les ondes sont décalées ; une faible lumière est émise.



Vu aérienne de l'interféromètre Virgo
© La Collaboration Virgo

Pour les détecter, les chercheurs utilisent l'interférométrie. Deux faisceaux lumineux, en opposition de phase, sont émis : lorsque l'un est à son maximum d'amplitude, l'autre est à son minimum. Chacun est envoyé dans un bras de l'interféromètre, perpendiculaire à l'autre et de même longueur, au bout duquel se trouve un miroir. Les faisceaux sont ensuite renvoyés vers un capteur lumineux où ils s'annulent s'il n'y a pas de perturbation. Cependant, lorsqu'une onde gravitationnelle passe, elle déforme les distances, ce qui décale les faisceaux lumineux. Ceux-ci ne s'annulent alors plus complètement et une faible lumière est détectée, signalant le passage de l'onde. La technologie et l'espace que nécessitent ces détecteurs sont considérables ; il n'en existe donc que trois sur Terre. Selon la direction de propagation de l'onde, l'un des détecteurs la reçoit avant les autres, ce qui permet d'en déterminer approximativement la provenance. Les ondes gravitationnelles permettent d'étudier de nombreux phénomènes astrophysiques, tels que les trous noirs, les étoiles à neutrons ou l'expansion de l'Univers, mais aussi de tester la théorie de la relativité générale d'Einstein.



Une vue d'artiste d'un des satellites de LISA en chemin vers le point de Lagrange L1. © ESA/C. Carreau

Sur Terre, de nombreux phénomènes peuvent perturber le détecteur. Comme il doit être très sensible afin d'être capable de mesurer des variations extrêmement faibles, la moindre vibration engendrée par exemple par le passage d'un camion ou le saut d'un animal peut fausser les résultats. Pour s'affranchir de ces perturbations, des scientifiques travaillent sur un détecteur d'ondes gravitationnelles spatial : le projet LISA. Avec trois satellites distants entre eux de 2,5 millions de kilomètres, orbitant à 60 millions de kilomètres derrière la Terre et fonctionnant selon le principe d'interférométrie, LISA sera capable d'observer des objets bien plus lourds, tels que des trous noirs supermassifs. De manière analogue aux interféromètres terrestres, la provenance des ondes sera localisée à partir du satellite qui recevra l'information en premier. Ce projet européen sera lancé en 2035 par une fusée Ariane 6, depuis la base de Kourou en Guyane.

Alexis Lebois, Marie Pizana, Marjane Santucci et Pietro Rossi

L'ETUDE DES GALAXIES LOINTAINES

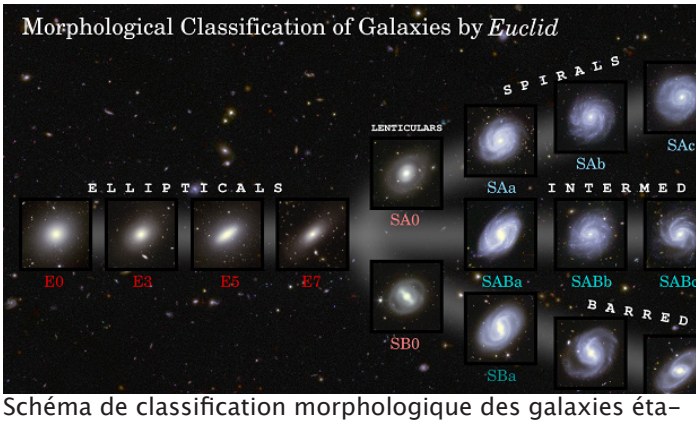


Schéma de classification morphologique des galaxies établi avec les données d'Euclid. © ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA, diagramme par J.-C. Cuillandre, L. Quilley, F. Marleau.

Notre système solaire se situe dans une galaxie : la Voie lactée. Les galaxies sont d'immenses structures cosmiques essentiellement composées d'étoiles, de gaz, de poussières et de matière noire, maintenues ensemble par la gravité et stabilisées par la force centrifuge. Elles peuvent contenir des millions, voire des milliards d'étoiles autour desquelles tournent leurs planètes. Et des galaxies, il en existe des milliards dans l'Univers ! Depuis une centaine d'années, grâce à Edwin Hubble en 1926, on considère qu'il en existe trois grands types : les spirales, les elliptiques et les irrégulières, elles-mêmes divisées en sous-catégories. Cette classification ne s'applique qu'aux galaxies de notre environnement proche mais ne peut s'étendre aux galaxies lointaines.



Le télescope spatial James Webb (JWST), auquel participent trois agences spatiales (l'ESA, la NASA et la CSA/ASC) et 15 pays, a justement été élaboré dans les années 90 pour en apprendre davantage sur les galaxies lointaines et fut finalement lancé le 25 décembre 2021 depuis Kourou. Il a pour mission l'étude des premières galaxies, celles créées au commencement de l'Univers, des exoplanètes et du Système Solaire.



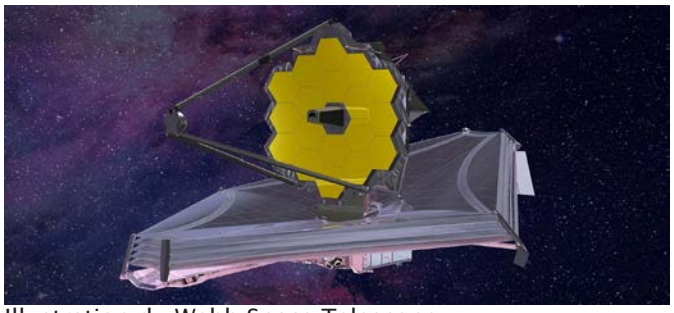


Illustration du Webb Space Telescope
© Northrop Grumman

JWST est composé de 18 miroirs primaires de 2 mètres de diamètre chacun, dont le champ de vision est exclusivement axé dans l'infrarouge, d'un miroir secondaire chargé de concentrer les rayonnements en direction des quatre instruments scientifiques à bord : NIRSpec, NIRCam, MIRI et FGS/NRISS. Il est actuellement situé au point L2, à 1,5 million de kilomètres de la Terre.

La sensibilité du JWST à l'infrarouge nous permet d'observer les galaxies les plus lointaines. En effet, la lumière émise par les galaxies tend de plus en plus vers le rouge, en conséquence de l'expansion de l'Univers et grâce à l'effet Doppler, ce qui nous permet de déduire leur distance. Grâce au JWST, nous avons découvert la galaxie MoM-z14, qui est la plus lointaine jusqu'ici observée. Sa lumière a été émise il y a plus de 13,5 millards d'années !

Côme Beyssac, Marie Pizana, Chahine Yelles Chahouche

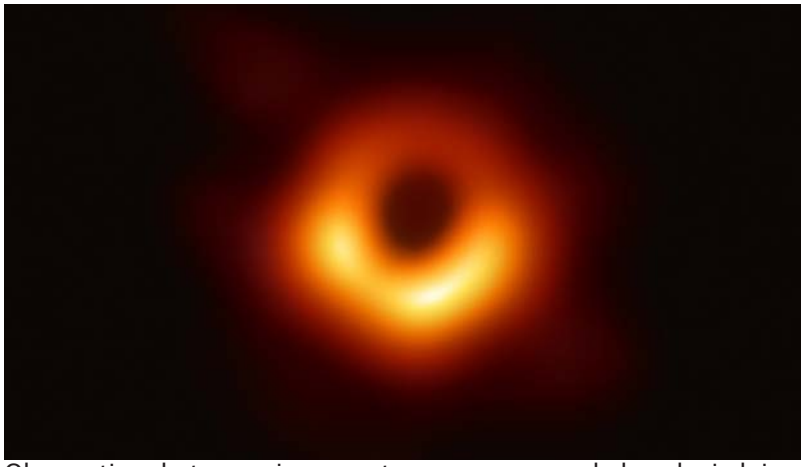
PAS D'IDEES, TROU NOIR

« Les trous noirs sont les objets les plus parfaits de l'Univers, car ils sont définis uniquement par l'espace et le temps. » - Subrahmanyan Chandrasekhar

Vous voyez quand vous prêtez de l'argent à une certaine personne mais que cette dernière ne vous rembourse jamais ? Elle est la réincarnation humaine des trous noirs. Une existence qui absorbe tout et ne laisse aucune trace derrière elle.

Il était une fois ... un trou noir

Même si les trous noirs restent mystérieux encore aujourd'hui, leur histoire a bien commencé quelque part... Elle a trouvé ses racines vers la fin du XVIIe siècle, avec la toute première mention d'un « astre invisible ». C'est en 1783 que John Mitchell émet l'hypothèse de l'existence d'un astre dont la vitesse de libération serait si élevée qu'elle dépasserait celle de la lumière. Selon lui, pour détecter cet astre invisible, il faudrait alors observer les effets gravitationnels qu'il exerce sur les étoiles. En 1796, Pierre Laplace reprend ces observations avant qu'elles ne tombent dans l'oubli. Il faudra attendre 1915, année durant laquelle Albert Einstein formule sa nouvelle théorie de la gravitation : la relativité générale. Il ne parvient cependant pas trouver une solution. C'est l'année suivante que Karl Schwarzschild apporte une réponse en décrivant un objet dont la gravité est si importante que même la lumière en reste prisonnière, ce qui correspond à un trou noir, terme encore inexistant à l'époque. Vers la fin des années 1920, Subrahmanyan Chandrasekhar montre qu'un objet astrophysique peut s'effondrer sur lui-même sous l'effet de sa propre gravité. Néanmoins, Albert Einstein reste sceptique face à cette théorie.



Observation du trou noir gargantuesque au cœur de la galaxie lointaine Messier 87 © Event Horizon Telescope Collaboration

Le débat sur les trous noirs ressurgit vers la fin des années 1950. Les pulsars, un type d'étoile à neutrons, sont découverts en 1967. La même année, le terme « trou noir » est employé pour la première fois par John Wheeler. En 1971, grâce à la découverte du premier potentiel trou noir, Cygnus X-1, observé par le premier télescope spatial Uhuru, la communauté scientifique éprouve un regain d'intérêt pour ces astres méconnus. La même année, Donald Lynden-Bell et Martin Rees prédisent l'existence d'un trou noir supermassif au centre de la Voie lactée. Les recherches sur les trous noirs se sont ensuite poursuivies, notamment grâce aux travaux de Stephen Hawking.

Il faut attendre 2012 pour que la première preuve visuelle d'un trou noir supermassif soit obtenue. Trois ans plus tard, un trou noir est détecté pour la première fois grâce à

la détection d'ondes gravitationnelles (GW150914). C'est en 2019 qu'une découverte historique fait la une des journaux : celle de la première image d'un trou noir, celui de la galaxie M87, baptisé M87*. L'image du trou noir de notre galaxie, Sagittarius A*, a été capturée en 2022. Les physiciens ont ainsi bien du mal à comprendre ce que sont les trous noirs, et il reste encore aujourd'hui de nombreuses zones d'ombre.

1, 2, 3 : Action, trou noir !

Avant d'apprendre comment les trous noirs se forment, penchons-nous d'abord sur leurs différents types. En effet, il en existe des stellaires, des supermassifs, des intermédiaires et des primordiaux.

Un trou noir stellaire est le résidu d'une étoile massive après son explosion en supernova, due à son effondrement sur elle-même à la fin de sa vie. Ce processus n'a cependant pas toujours lieu : pour se produire, il faut que l'étoile possède une certaine masse. En théorie, il peut y avoir formation d'un trou noir indépendamment de sa masse. Cependant, nous ne connaissons aucun processus naturel permettant d'engendrer un trou noir d'une masse inférieure à 1,5 masse solaire. L'objet céleste, si sa masse est supérieure à la limite d'Oppenheimer-Volkoff (environ 3,2 masses solaires), se transformera en une singularité, causant la formation d'un trou noir.

Un trou noir supermassif est défini comme étant un trou noir dont la masse est supérieure à un million de masses solaires. Il est couramment admis que chaque galaxie de grande taille abrite un de ces objets célestes. Cependant, bien que nous en ayons observé un dans presque toutes les galaxies, la manière dont ils se forment est encore aujourd'hui débattue autour de deux principales hypothèses.

La première est que les trous noirs supermassifs seraient des trous noirs stellaires qui ont accumulé une très grande quantité de matière sur plusieurs milliards d'années. La seconde, fondée sur des recherches récentes, est qu'ils se forment dans des amas globulaires, c'est-à-dire des amas stellaires. Ces amas d'étoiles sont des regroupements d'étoiles qui ont la même origine, donc le même âge, et qui sont liées entre elles par la gravitation. Leur densité est très élevée, et ils peuvent contenir jusqu'à un million d'étoiles dans un rayon de seulement quelques dizaines d'années-lumière.

Les secrets de ces fameux trous noirs

Lorsque vous entendez le mot « trou noir », que vous vient-il à l'esprit ? Beaucoup voient ces objets mystérieux comme une sorte de rond noir agissant comme un aspirateur géant, mais qu'en est-il réellement ? C'est ce que nous allons découvrir !

Contrairement à l'image populaire de l'aspirateur, un trou noir n'aspire pas activement la matière à distance. Il s'agit plutôt d'une région de l'espace où une quantité phénoménale de matière a été comprimée dans un espace infiniment petit. Imaginez que l'on compacte le Soleil jusqu'à ce qu'il ait la taille d'une petite ville : la force de gravité deviendrait gigantesque et courberait l'espace-temps de manière spectaculaire. Cet espace serait alors tellement massif et dense que même la lumière ne pourrait pas s'en échapper !

En effet, chaque objet céleste possède une « vitesse de libération », c'est-à-dire la vitesse minimale requise pour s'extraire de son attraction gravitationnelle (sur Terre, elle est de 11,2 km/s). Dans le cas d'un trou noir, dès que l'on franchit une frontière

invisible appelée l'horizon des événements, la vitesse de libération devient supérieure à la vitesse de la lumière (environ 300 000 km/s). Comme rien dans l'Univers ne peut dépasser cette vitesse limite, absolument rien, pas même un rayon lumineux, ne peut en ressortir, ce qui le rend totalement invisible à nos yeux.

Malgré leur taille et leur masse gigantesques, les trous noirs ont, comme nous, une durée de vie limitée… de plusieurs milliards de milliards de milliards d'années ! En effet, en 1974, le célèbre physicien Stephen Hawking a révolutionné l'astrophysique en découvrant que les trous noirs ne sont pas complètement « noirs ». En combinant la physique quantique et la relativité générale, il a démontré qu'ils émettent un infime rayonnement thermique, aujourd'hui appelé le « rayonnement de Hawking ».



En émettant ce rayonnement, le trou noir perd très lentement de la masse. Ce phénomène d'évaporation est presque imperceptible pour les trous noirs les plus massifs, mais il s'accélère à mesure que le trou noir perd de la masse, jusqu'à se terminer par une explosion finale d'une puissance colossale.



La représentation du trou noir et de son horizon des événements dans le film Interstellar est proche de la théorie dans le cas d'un trou noir en rotation. © R.Hurt/Caltech

Mais au fait, qu'en est-il du temps autour des trous noirs ? Est-ce vraiment comme dans le film Interstellar ? La réponse est un grand oui ! Selon la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein, la masse courbe le tissu de l'espace-temps. Plus un objet est massif et dense, plus le temps s'écoule lentement à sa proximité. Si vous restiez quelques heures juste au bord de l'horizon des événements d'un trou noir avant de revenir sur Terre, vous constateriez que des décennies, voire des siècles, se sont écoulés pour le reste de l'humanité. Le temps s'y écoule littéralement au ralenti par rapport au reste de l'Univers.

En conclusion, les trous noirs ne sont pas de simples destructeurs cosmiques, mais les laboratoires les plus extrêmes de la physique moderne. En réunissant la relativité générale et la physique quantique, ils repoussent les limites de notre compréhension de l'espace, du temps et de la matière. Ils nous rappellent que l'Univers cache encore ses plus grands secrets derrière des horizons d'ombre que la science commence à peine à éclairer.

Edwige Benanteur, Amélie Chun et Timothé Le Hénaff

SURSAUTS GAMMA : L'UN DES MESSAGERS DES PLUS GRANDES CATASTROPHES COSMIQUES

HISTOIRE

Le 10 octobre 1963, en pleine guerre froide, les États-Unis, le Royaume-Uni, l'Union soviétique et plusieurs autres pays signent un traité interdisant les essais nucléaires dans l'atmosphère, dans l'espace et sous l'eau. L'objectif est de limiter la course aux armements nucléaires et de réduire les risques pour l'humanité. Malgré cet accord, la méfiance entre les deux grandes puissances reste très forte. Les États-Unis craignent notamment que l'Union soviétique ne réalise secrètement des essais nucléaires dans l'espace.

Pour surveiller le respect du traité, les Américains lancent, en 1967, les satellites Vela. Leur mission est simple : détecter les rayons gamma produits par une explosion nucléaire afin d'identifier toute violation de l'accord. Cependant, les satellites observent un phénomène totalement inattendu. Au lieu de détecter des explosions nucléaires sur Terre ou dans son voisinage, ils enregistrent d'intenses bouffées de rayons gamma provenant des confins de l'Univers. Les scientifiques comprennent rapidement que ces signaux ne sont pas d'origine humaine, mais qu'ils sont liés à des événements cosmiques d'une puissance extraordinaire.

Cette découverte marque la première observation des sursauts gamma, aujourd'hui considérés comme les phénomènes les plus énergétiques de l'Univers depuis le Big Bang. Elle montre également que certaines avancées scientifiques majeures peuvent naître d'expériences conçues pour répondre à des enjeux politiques ou militaires.

DIFFERENTS TYPES

Il existe deux types de sursauts gamma : les sursauts courts, qui durent d'une à deux secondes, et les sursauts longs, qui durent généralement une dizaine de secondes, mais peuvent parfois se prolonger bien au-delà.


Supernova © MTV international

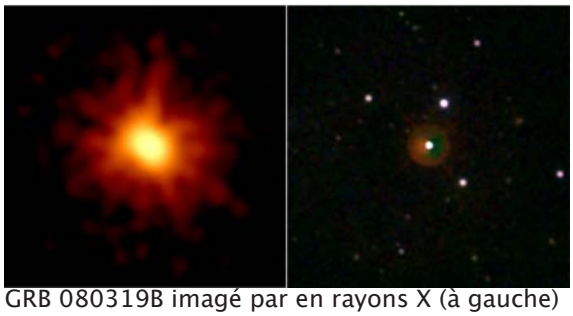
Les sursauts courts seraient causés par la collision de deux étoiles à neutrons ou d'une étoile à neutrons avec un trou noir, tandis que les sursauts longs seraient provoqués par l'effondrement d'étoiles massives donnant naissance à une supernova. Cependant, cette distinction n'est pas toujours aussi nette : certaines collisions d'objets compacts peuvent produire un sursaut long, tandis que certaines supernovas peuvent être à l'origine d'un sursaut court.

Ces événements font partie des phénomènes les plus énergétiques de l'Univers observable et libèrent, en quelques instants, une quantité d'énergie colossale, parfois supérieure à celle que le Soleil émettra durant toute sa vie. Les sursauts gamma sont éga-

lement importants pour l'étude de l'évolution des galaxies, car ils peuvent influencer leur environnement en produisant des jets de particules extrêmement énergétiques. Leur détection reste cependant complexe, car ils apparaissent de manière totalement imprévisible et ne durent qu'un très court laps de temps, ce qui oblige les astronomes à utiliser des satellites spécialisés capables de réagir rapidement.

De plus, les recherches actuelles suggèrent que certains modèles théoriques pourraient encore évoluer. Par exemple, il est possible que plusieurs mécanismes différents soient à l'origine de chaque type de sursaut et que la classification en « sursauts courts » et « sursauts longs » ne soit en réalité qu'une simplification d'un phénomène plus complexe. Les scientifiques continuent donc d'observer ces explosions afin de mieux comprendre les dernières étapes de la vie des étoiles ainsi que les interactions extrêmes entre objets compacts dans l'Univers.

LES PLUS REMARQUABLES



GRB 080319B imagé par en rayons X (à gauche) et dans le visible/ultraviolet (à droite).
© NASA/Swift/Stefan Immler, et al.

Bien que tous les sursauts gamma soient exceptionnels, certains le sont plus que d'autres. C'est notamment le cas de GRB 080319B, surnommé le « Naked-Eye Burst » (« sursaut visible à l'œil nu »), d'une puissance telle qu'il fut visible à l'œil nu pendant environ 30 secondes. Observé le 19 mars 2008, il détient le record de l'objet le plus lointain théoriquement visible à l'œil nu.

Un autre sursaut remarquable est GRB 090423, le plus ancien jamais détecté. Observé le 23 avril 2009, il est situé à environ 13 milliards d'années-lumière de la Terre et possède un décalage vers le rouge de z = 8,2, conséquence de l'expansion de l'Univers. Il a duré environ 10 secondes.

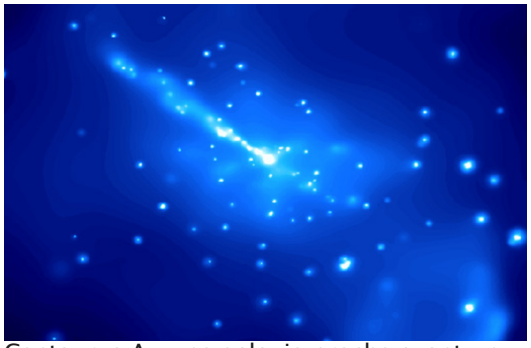
Enfin, on peut également citer GRB 221009A, surnommé le BOAT (Brightest Of All Time). Détecté le 9 octobre 2022, il a duré environ 10 minutes, mais son rayonnement est resté détectable pendant plus de 10 heures après son observation initiale. Sa puissance était telle qu'il a perturbé l'ionosphère terrestre. Les photons les plus énergétiques détectés atteignaient environ 18 téraélectronvolts (TeV), et sa puissance isotrope maximale est estimée à environ $2{,}1 \times 10^{47}$ W. À titre de comparaison, le Soleil produit une énergie totale d'environ $1{,}2 \times 10^{34}$ joules (soit $3{,}8 \times 10^{26}$ W en permanence) au cours d'une année.

LES JETS ULTRA RELATIVISTES

« Les sursauts de rayons gamma (Gamma Ray Bursts, GRB) sont des événements transitoires associés à des explosions d'étoiles ou à des fusions d'étoiles à neutrons. Ces flashs de rayons [...] sont généralement associés à des jets relativistes qui doivent traverser la matière stellaire, créant une onde de choc dans le milieu interstellaire entourant le progéniteur du GRB », indique un article paru le 2 mars 2020 dans The Astrophysical Journal Letters. Les jets relativistes sont des jets de plasma extrêmement énergétiques se déplaçant à des vitesses proches de celle de la lumière. Ils sont notamment émis par des trous noirs et des étoiles à neutrons.

SVOM

SVOM (Space-based multi-band astronomical Variable Objects Monitor) est une mission spatiale développée conjointement par la France et la Chine. Lancée le 22 juin 2024, elle a pour objectif principal de détecter rapidement les sursauts gamma, puis d'alerter les observatoires du monde entier afin qu'ils puissent les observer avant qu'ils ne disparaissent. Pour détecter ces événements, SVOM est équipé de plusieurs instruments complémentaires.



Centaurus A : une galaxie proche ayant un noyau actif © NASA/SAO/R.Kraft et al.

Le premier est ECLAIRs, un télescope capable de détecter les rayons X et les rayons gamma de faible énergie. Son fonctionnement repose sur une technologie appelée masque codé. Ce masque est constitué d'un motif précis de zones opaques et de trous. Lorsque les rayons gamma provenant du ciel traversent ce masque, chaque source projette une ombre différente sur un plan de détection situé derrière celui-ci. L'image obtenue correspond alors à la superposition des motifs de toutes les sources observées. Grâce à une méthode mathématique appelée déconvolution, il est ensuite possible de reconstruire l'image du ciel et de déterminer avec précision la position de la source du sursaut gamma. Ce système ingénieux permet de localiser très rapidement le phénomène et de transmettre l'information aux astronomes en seulement quelques minutes. Cette rapidité est essentielle, car les sursauts gamma sont très courts et leur émission s'affaiblit rapidement après leur apparition.

Le Gamma-Ray Monitor (GRM), deuxième instrument de la mission, est composé de trois détecteurs chargés de mesurer le spectre énergétique ainsi que l'évolution de l'intensité des rayons gamma lors d'un sursaut. Son fonctionnement repose sur un **scintillateur**. Lorsqu'un photon gamma pénètre dans le détecteur, il interagit avec le matériau scintillant, qui transforme une partie de son énergie en une faible émission lumineuse. Cette lumière est ensuite amplifiée par un tube photomultiplicateur, ce qui permet de mesurer précisément l'énergie du photon incident. Les trois détecteurs sont orientés dans des directions différentes : chacun possède un champ de vision de ±60°, est incliné de 30° par rapport à l'axe d'ECLAIRs, et les trois modules sont espacés de 120° les uns des autres. Ensemble, ils couvrent un champ de vue similaire à celui d'ECLAIRs, tout en permettant également, grâce à une méthode de triangulation, d'estimer la position d'un sursaut gamma avec une précision d'environ 15° × 15°, même lorsque celui-ci se situe en dehors du champ d'observation direct d'ECLAIRs.

Le GRM peut également déclencher lui-même une alerte à bord de SVOM. Il fournit immédiatement l'heure d'arrivée ainsi qu'une position approximative du sursaut, informations qui sont transmises à ECLAIRs ainsi qu'aux observatoires terrestres, comme les télescopes GWAC ou les détecteurs d'ondes gravitationnelles LIGO et Virgo. Cette coopération permet d'observer un même événement sous différentes formes de rayonnement et d'obtenir davantage d'informations sur son origine. Le GRM est capable de détecter environ une centaine de sursauts gamma par an.

Depuis son lancement en juin 2024, SVOM a déjà obtenu d'excellents résultats. Au 27 juin 2025, il avait détecté 325 sursauts gamma, dont 279 grâce au GRM et 108 grâce à ECLAIRs. Certains de ces événements ont été observés simultanément par plusieurs télescopes terrestres, permettant ainsi de réaliser des études très détaillées.


Illustration of the SVOM spacecraft © CNES/GEKO

L'objectif de la mission SVOM est d'améliorer notre compréhension des sursauts gamma, mais également d'étudier les phénomènes les plus extrêmes de l'Univers. Ces observations apportent de précieuses informations sur la formation des trous noirs, les étoiles à neutrons, les ondes gravitationnelles et l'évolution des galaxies. En combinant les données provenant de nombreux observatoires, SVOM participe au développement de l'astronomie dite multi-messagers, qui consiste à étudier un même événement à travers différents types de signaux (lumière, rayons gamma, ondes gravitationnelles, etc.). Cette approche permet d'obtenir une vision beaucoup plus complète des phénomènes cosmiques et d'approfondir notre connaissance de l'Univers.

Côme Beyssac, Louis Carayrol, Sacha Emmel, Timothé Le Henaff, Nataniel Llano Martinez

REMERCIEMENTS

L'Académie Spatiale d'Île-de-France rassemble plusieurs universités, grandes écoles et laboratoires de recherche de la région parisienne impliqués dans le domaine spatial.

Son objectif est de faire connaître les formations et les métiers du spatial, mais aussi de préparer les compétences dont le secteur aura besoin dans les années à venir. Ces compétences concernent des domaines variés tels que l'ingénierie, la recherche, l'observation de la Terre, l'exploration spatiale, l'environnement, les données, la santé, le droit ou encore les sciences humaines.

Ce projet s'inscrit dans le cadre de la stratégie nationale France 2030, qui soutient l'innovation, les secteurs d'avenir et le développement de nouvelles compétences.
Université Paris Cité et Sorbonne Université, membres de cette Académie, se sont associées pour vous accueillir aujourd'hui et vous faire découvrir une partie des recherches, des formations et des métiers liés au spatial.

UNIVERSITE PARIS CITE

Laboratoire AstroParticule et Cosmologie
Salim Addoun
Washington Georges
Cyril Lachaud
Lucas Pardessus
Damien Prele
Maxime Vincent

Institut de physique du globe de Paris
Jérémy Billant
Olivier Bonnot
Gabrielle Chabaud
Robin Deborde
Michel Diament
Mélanie Drilleau
Sébastien de Raucourt
Marouchka Froment
Corentin Gervais
Kevin Gobron
Emma Gourrion
Gauthier Hulot
Philippe Lognonné
Antoine Lucas
Maximilien Salinas
Sasha Troncy-Portier

Integrative Neuroscience & Cognition Center
Mathieu Beraneck

Laboratoire Interdisciplinaire des énergies de demain
Nicolas Delbart

Paris-Centre de Recherche Cardiovasculaire
Pierre Boutouyrie
Marc-Antoine Custaud

SORBONNE UNIVERSITE

Institut ∂'Alembert
Théo Bouttekein
Jean-Marie Citerne
Augustin Schmitt
Guillaume Legros
Alexis Matynia
Basile Radisson
Adeline
Axelle

Institut d'astrophysique de Paris
Jolan Lavoisier
Jean Mouette
Alain Riazzuelo

Génie électrique et électronique de Paris
Christian Lorenzi
Rayan Ouazar
Fares Ousmer
Augustin Pelage

Laboratoire Atmosphère et observations spatiales
Georges Baaklini
Camille Viatte

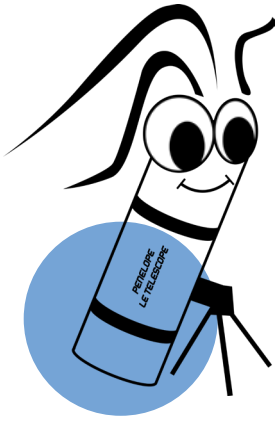
Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie
Olivier Beyssac

Je pensais être sûre de vouloir être astrophysicienne et que ce stage allait me le confirmer. La bonne nouvelle, c'est que ce stage m'a bien confirmé que je voulais faire du spatial mon métier. La mauvaise, c'est que je ne sais maintenant plus dans quel domaine... Ce stage m'a permis de découvrir tellement de choses passionnantes !! Je me suis presque sentie en vacances :) Je suis vraiment heureuse d'avoir eu cette opportunité.
Marjane Santucci

Ce stage a été excellent, je n'ai rien d'autre à dire !
Chahine Yelles Chaouche

LES

Merci à Audrey et Émilie pour nous avoir accompagnés durant ce stage qui nous a permis d'en apprendre plus sur le secteur de l'Espace et les métiers qui y touchent.
Sacha Emmel



MOTS

Merci pour ce stage exceptionnel. J'ai passé 2 semaines super et j'ai pu découvrir des milliers de sujets super interessants. Merci beaucoup !
Louis Carayrol

Pour moi, ces deux semaines ont été une opportunité formidable de découverte et d'apprentissage. Au fil des interventions, j'ai approfondi mes connaissances tout en laissant libre cours à ma curiosité, qui n'en ressort que renforcée ! Certains questionnements ont trouvé une réponse, d'autres se sont formés : des questions et des questions qui me propulseront toujours plus en avant... Quoi qu'il en soit, ce stage a été une expérience mémorable ; totalement recommandé !
Claire Yu

Un super stage spatial !
Elioth Dupont



DES

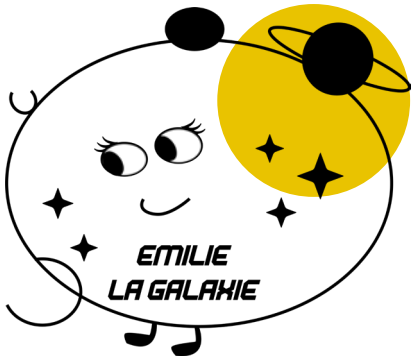
Merci énormément pour ce stage, j'ai appris énormément et je me suis beaucoup amusé ! Je suis extrêmement reconnaissant envers tous ceux qui ont pris de leur temps pour nous expliquer leur métier et leur domaine de recherche dans la bonne humeur. Je les remercie également d'avoir changé ma vision sur le monde de la recherche.
Timothée Le Hénaff

Ce stage m'a donné l'opportunité d'en apprendre beaucoup, que ce soit en astrophysique ou dans les sciences en général, mais également sur mon futur et ce vers quoi j'aimerais m'orienter ! Nous avons eu des visites et des cours passionnants avec des chercheurs et des ingénieurs passionnés qui étaient très motivants. Un grand merci à Audrey Le Reun et Émilie Pernet qui nous ont constitué ce super programme et nous ont accompagnés tout au long du stage.
Edwige Benanteur

STAGIAIRES

Très intéressée par les sciences, j'ai trouvé que ce stage était une expérience très enrichissante. Il m'a permis d'acquérir de nombreuses connaissances et de rencontrer des personnes passionnées et inspirantes, qu'il s'agisse des chercheurs ou des autres stagiaires. Je garderai un excellent souvenir de cette expérience. Encore un grand merci à Audrey et Émilie pour ce stage incroyable !!
Marie Pizana

C'était très enrichissant, intéressant et j'ai appris que la seule chose que je sais, c'est que je ne sais rien.
Nataniel Llano Martinez

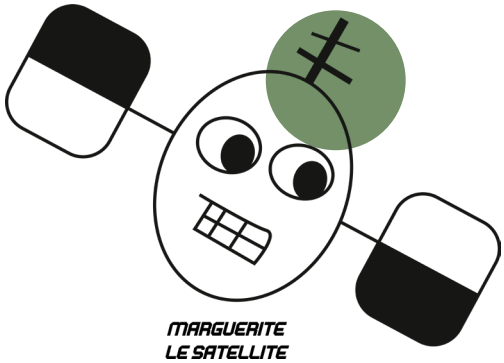


Ce stage a été une opportunité fantastique, non seulement pour découvrir les métiers de l'espace, mais aussi pour rencontrer d'autres personnes de mon âge qui brûlent de la même passion. J'en garderai toujours un souvenir.
Pietro Rossi

Merci beaucoup pour cette semaine de stage ! J'ai appris plein de choses sur le spatial et ça m'a vraiment aidé à y voir plus clair pour mon avenir. Merci pour votre accueil, votre bonne humeur et le temps que vous m'avez consacré.
Côme Beyssac

Deux semaines à l'Académie spatiale IdF, c'était un peu comme un atterrissage réussi sur Mars : intense, fascinant et sans crash critique. Entre l'analyse des séismes d'InSight et les futurs plans pour la Lune, j'ai officiellement mesuré à quel point travailler dans le spatial demande d'avoir la tête dans les étoiles... mais les pieds bien sur Terre (et un bon approvisionnement en café). Une immersion incroyable qui confirme mon envie de continuer à décoder les secrets de l'Univers. Merci plus particulièrement à mes maîtres de stage pour l'accueil, vous êtes des étoiles !
Alexis Lebois

Un grand merci à tous ceux qui ont pris le temps de venir nous partager leurs connaissances.
Ce stage a été une vraie expérience, autant sur le plan social que scientifique. Je ressors avec mille connaissances en plus, toujours plus enrichissantes les unes que les autres. Si je pouvais le refaire encore une fois, je foncerais tête baissée !!!
Amélie Chun



J'ai beaucoup apprécié ce stage et l'ai trouvé très intéressant et agréable, malgré mes nombreuses absences et mon manque de sommeil. Merci beaucoup.
Kolia Zaoui Hind



Image générée par IA/Canva