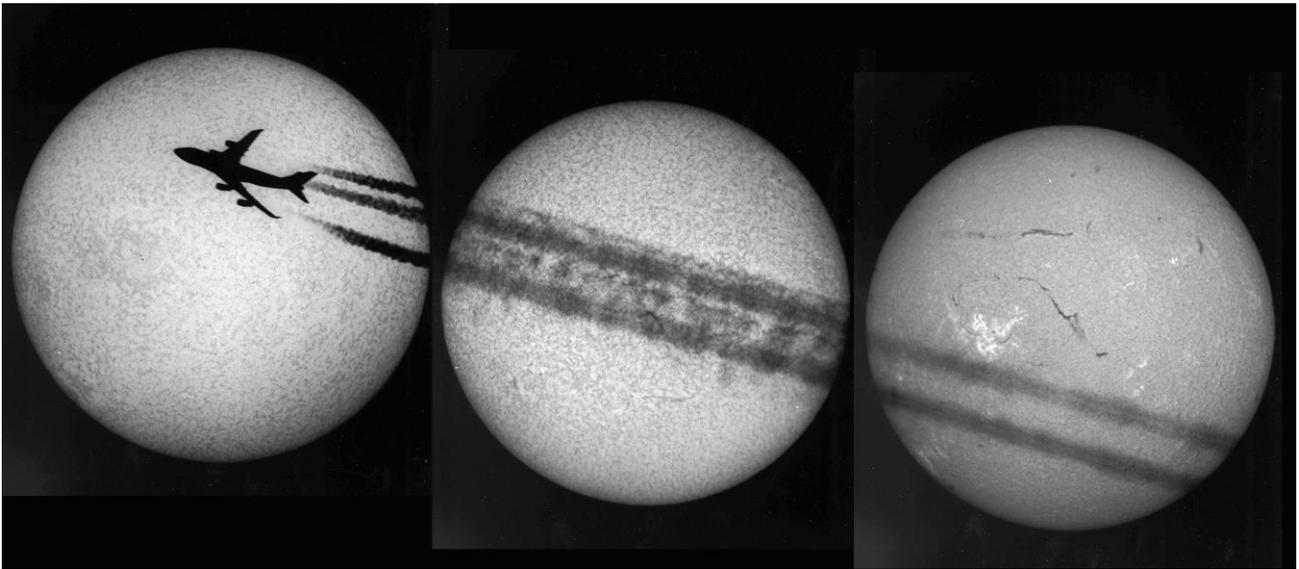
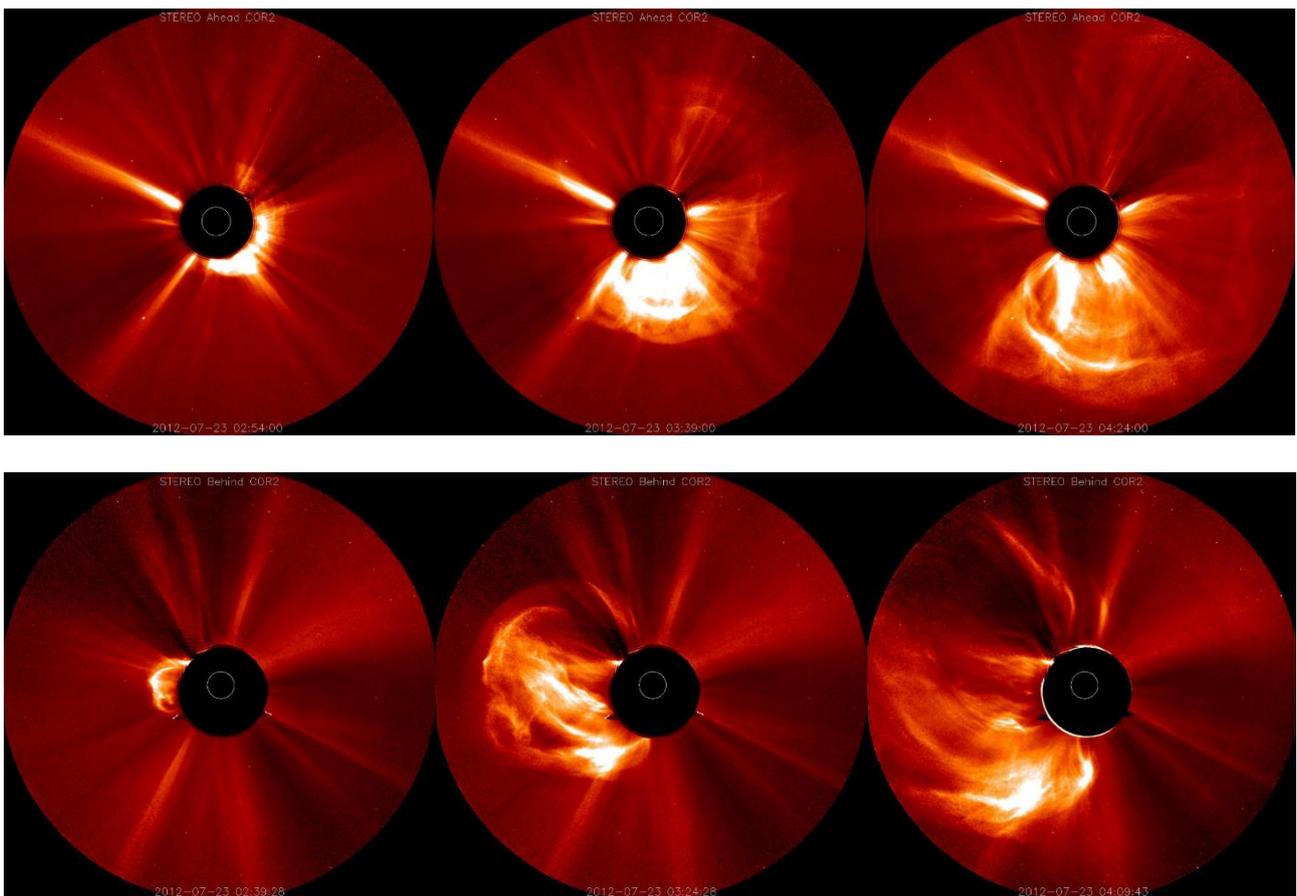


Chapitre 1 : l'observation du Soleil



Un avion de ligne passe par hasard dans le champ des télescopes de Meudon ©OP



La grosse éjection de matière du 23 Juillet 2012 en vision stéréoscopique par les sondes STEREO A (haut) et B (bas), précédant et suivant la Terre sur son orbite autour du Soleil, alors écartées de 120°. Sous deux angles de vue, on peut prédire si l'environnement terrestre risque d'être affecté. Le phénomène dure quelques heures. Le cercle blanc représente le Soleil, le disque noir central est un occulteur anti éblouissement ©STEREO/NASA

Le Soleil est une étoile ordinaire parmi les 200 milliards que compte notre Galaxie, la Voie Lactée. Proche de nous, il présente un diamètre apparent sur le ciel d'un demi-degré (comme la Lune) : c'est la seule étoile qui révèle au télescope les détails de sa surface. Nous allons retracer la fabuleuse épopée des observations du Soleil depuis Galilée, avant d'aborder la façon dont on l'observe aujourd'hui, ainsi que les grands projets qui verront le jour dans la prochaine décennie.

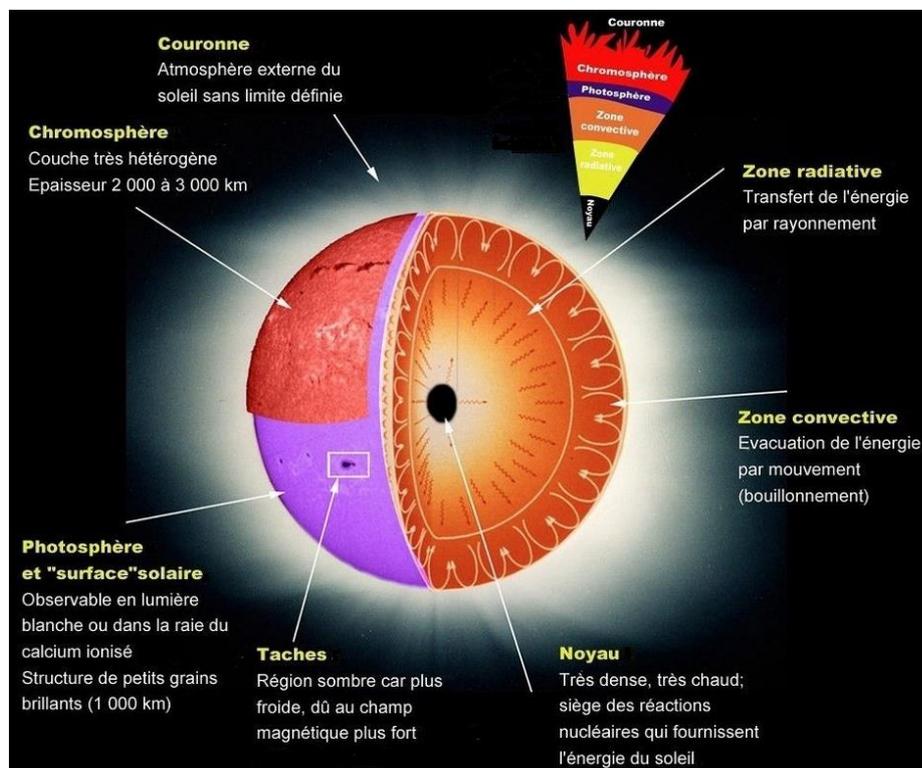
1 – Qu'est ce que le Soleil ?

Le Soleil est une étoile, sphère de gaz chauds qui produit en son cœur de l'énergie et rayonne dans l'espace. Il est composé de 90% d'Hydrogène et de 10% d'Hélium ; il existe beaucoup d'autres éléments plus lourds en trace, comme les métaux que l'on trouve sur Terre, mais à l'état gazeux. Une étoile particulière, qui a permis l'apparition de la vie sur Terre !

Au centre, des réactions thermonucléaires de fusion transmutent l'Hydrogène en Hélium en produisant de l'énergie. Celle-ci traverse lentement l'étoile pour atteindre les couches superficielles où elle est émise sous forme d'ondes électromagnétiques. Le Soleil rayonne surtout en Ultra Violet (UV), lumière visible (VIS) et Infra Rouge (IR) ; cependant ses émissions couvrent tout le spectre électromagnétique, des rayons γ et X aux ondes radioélectriques. L'atmosphère de la Terre joue le rôle d'un filtre en nous protégeant des rayons dangereux.

L'observation du Soleil a commencé en 1610 avec la lunette de Galilée. En lumière blanche, on découvre la photosphère à 5750 K, surface visible parsemée de taches sombres dont le magnétisme sera identifié bien plus tard. L'observation intrigante des taches occupa beaucoup les astronomes aux XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles.

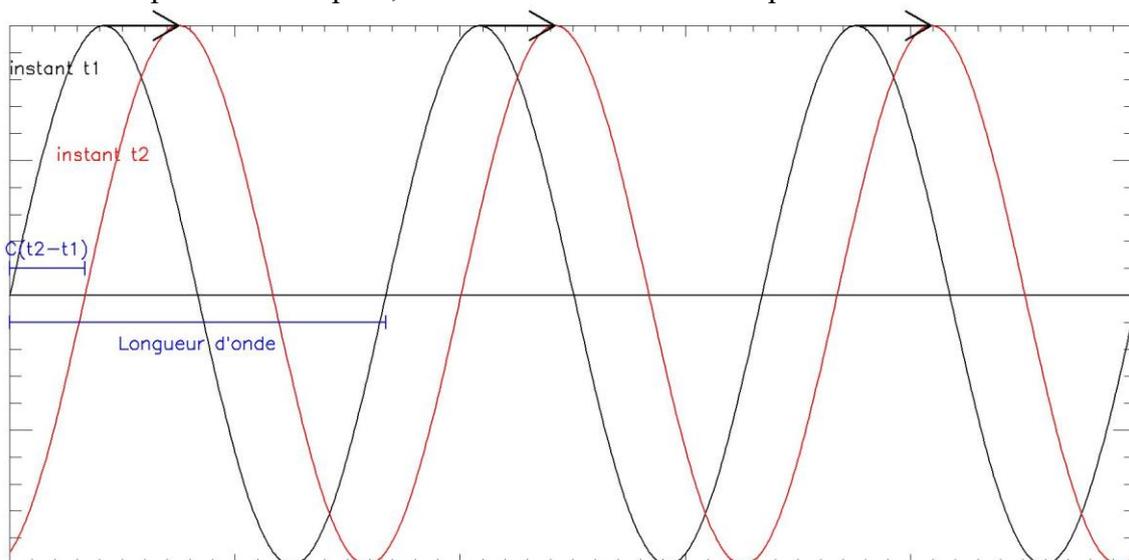
Au dessus de la photosphère se trouve la chromosphère (8000 K); elle n'apparaît qu'avec une technique spécialisée, la spectroscopie. C'est la raison pour laquelle elle ne devint accessible qu'au XIX^{ème} siècle. Au delà de la chromosphère, une atmosphère très diluée et chaude, la couronne (2 millions K), diffuse la lumière du disque et émet en UV. Elle raccorde le Soleil au milieu interplanétaire dans lequel baignent les planètes. Il a fallu attendre les instruments du XX^{ème} siècle pour l'étudier en dehors des éclipses totales, notamment avec l'avènement des télescopes en orbite.



Modèle en couches concentriques du Soleil : seule l'atmosphère (photosphère, chromosphère, couronne) est observable ©OP

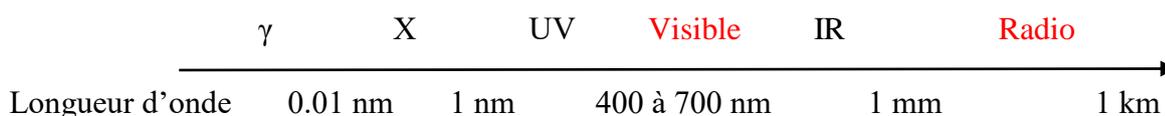
Les ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques nous renseignent sur le Soleil. Une onde est constituée d'une fluctuation de champ électrique qui se propage dans le vide ou un milieu transparent. On caractérise une onde par sa fréquence de vibration ν (nombre de vibrations par seconde ou Hertz) ainsi que par sa vitesse de propagation dans l'espace. La longueur d'onde λ est la distance au bout de laquelle le motif de l'onde se répète à l'identique. La lumière à laquelle nos yeux sont sensibles est une onde. Dans le vide, elle se propage à la vitesse $C = 300\,000\text{ km/s}$, elle mettra ainsi 8 minutes pour aller du Soleil à la Terre. Par exemple, une radiation verte possède une longueur d'onde de 0.5 microns et une fréquence de $6 \cdot 10^{14}$ Hertz. Sur la figure, l'onde se déplace vers la droite. Entre deux instants t_1 et t_2 , elle a parcouru la distance $C(t_2 - t_1)$. En un point de l'espace, l'onde se répète au bout d'une période $T = 1/\nu$; elle est donc périodique à la fois dans le temps et dans l'espace, et la relation entre ces deux périodes est $\lambda = C T$.

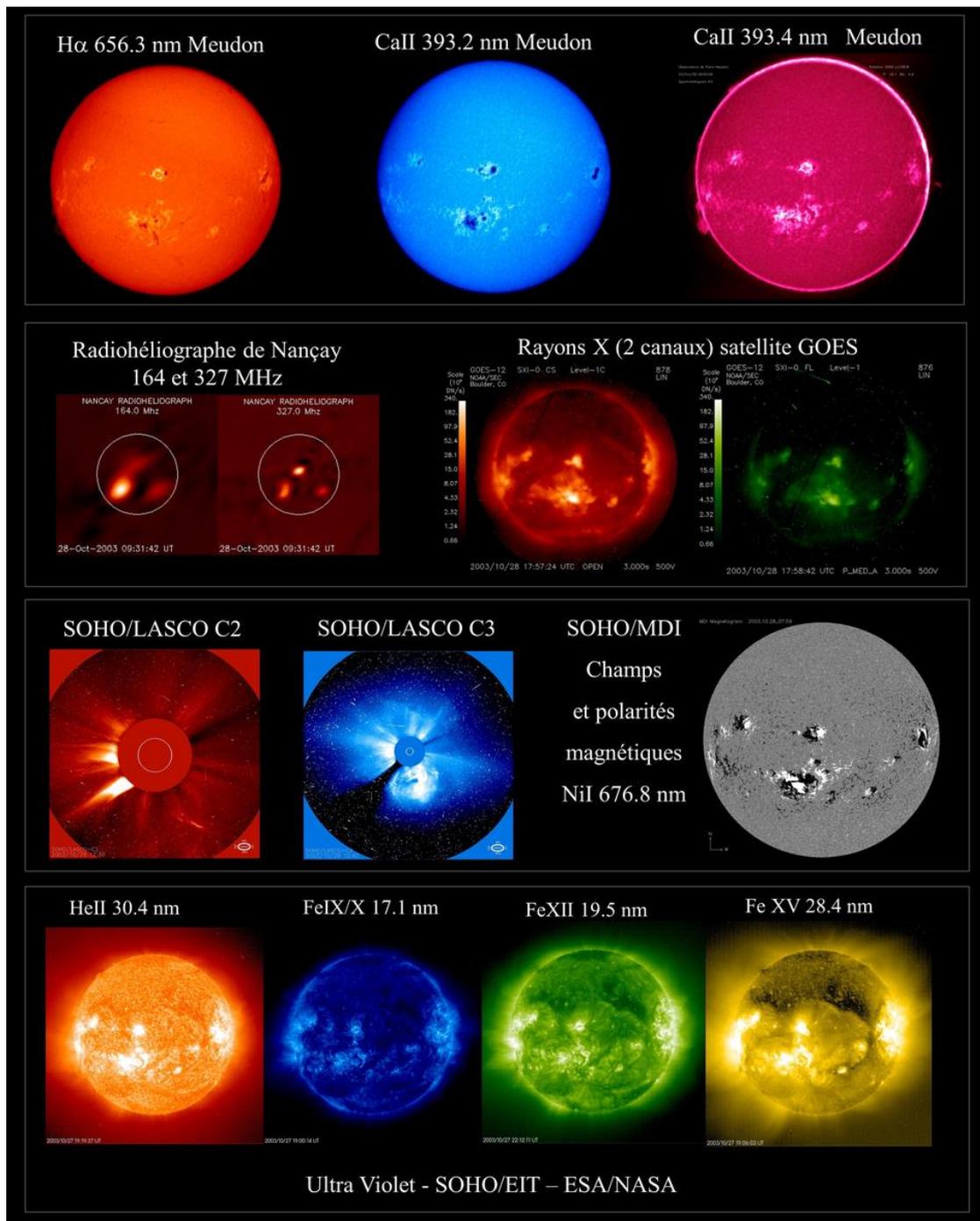


Le spectre électromagnétique

Le Soleil émet des ondes électromagnétiques d'énergies très différentes. Celle-ci est proportionnelle à la fréquence, ou inversement proportionnelle à la longueur d'onde. On appelle l'ensemble de ces émissions spectre électromagnétique. On peut classer les ondes par ordre d'énergie décroissante : rayons γ , X, UV, visible, IR, Radio. Nos yeux sont sensibles au domaine visible de 0.4 à 0.7 microns (couleurs de l'arc en ciel), c'est-à-dire à une infime partie du spectre, bien plus riche que ce que nous voyons ! L'IR représente la moitié de l'émission solaire. Le peu d'UV qui parvient au sol est responsable du bronzage de la peau. Les ondes radio ont des longueurs d'onde allant du mm au km : la télévision, la radiophonie, le Wifi, le four à micro ondes et les téléphones portables les utilisent. Les rayons γ et X sont les plus énergétiques, leur longueur d'onde est voisine des dimensions atomiques ; ils sont produits par les éruptions solaires. Les rayons X, absorbés par les os, servent à radiographier le corps humain.



L'atmosphère terrestre ne laisse passer que les rayonnements **visible** et **radio**.



Une vision multi-longueur d'onde du Soleil, le 28 Octobre 2003, jour où se produisit l'une des plus violentes éruptions de l'histoire moderne.

1^{ère} rangée : au sol à Meudon (OP), on observe la photosphère et la chromosphère dans la fourchette 5000 – 8000 K

2^{ème} rangée : les rayonnements radio des particules en mouvement (Nançay/OP) ; et dans l'espace, les rayons X des zones éruptives les plus chaudes (10 millions K, satellite GOES-NASA)

3^{ème} rangée : les coronographes spatiaux en lumière blanche montrent les éjections de matière loin du Soleil lors des éruptions (SOHO/LASCO-ESA/NASA) ; les champs magnétiques de surface (blanc/noir selon la polarité entrante ou sortante) sont observés par des instrument appelés « magnétographes » (SOHO/MDI-ESA/NASA).

4^{ème} rangée : la basse couronne de 80 000 à 2 millions de degrés se dévoile en UV selon les raies ou le degré d'ionisation d'un même élément comme le Fer (SOHO/EIT-ESA/NASA). Le Fer noté XV veut dire qu'il a perdu 14 électrons. De même, HeII désigne l'Hélium ayant perdu un électron.

Masse : $2 \cdot 10^{30}$ kg \approx 333 000 fois la Terre
 Diamètre : 1 392 000 km \approx 109 fois la Terre
 Diamètre angulaire sur le ciel : 0.53°
 Distance moyenne : 149,6 millions de km = 1 Unité Astronomique
 Densité moyenne : 1,4 (Terre = 5.52, eau = 1)
 Accélération de la pesanteur : 275 ms^{-2} (Terre 9.81 ms^{-2})
 Température au centre : 15 millions de degrés
 Température de surface (photosphère) : 5 750 degrés
 Température de la couronne (atmosphère externe) : 2 millions de degrés
 Vent solaire : 400 km/s à la Terre
 Perte de masse : 1 million de tonnes par seconde
 Luminosité (puissance rayonnée dans l'espace) : $3,86 \times 10^{26}$ W
 Puissance reçue par la Terre : $1\,362 \text{ W/m}^2$
 Composition chimique (nombre d'atomes) : hydrogène 94 %, hélium 6 %, traces d'autres éléments
 Composition chimique (en masse) : hydrogène 73 %, hélium 25 %, autres éléments 2 %
 Combustible : hydrogène (fusion en hélium dans le cœur)
 Rotation différentielle : 26 jours à l'équateur, 32 jours aux pôles
 Cycle d'activité : 11 ans
 Cycle magnétique : 22 ans
 Champ magnétique des taches : 0.2 Tesla
 Age : 5 milliards d'années
 Durée de vie : 10 milliards d'années

La loi de Wien et le rayonnement thermique

Tout corps rayonne ! Pour connaître la longueur d'onde λ du rayonnement thermique d'un corps de température absolue T (en Kelvin ou K), on applique la loi de Wien $\lambda T = 0.0029$.
 Notre corps est à la température absolue de 310 K. Il rayonne des ondes électromagnétiques IR à 10 microns. La Terre et les objets familiers émettent dans l'IR. L'effet de serre est dû à la réflexion du rayonnement IR terrestre par l'atmosphère vers le sol ; il permet d'entretenir une température compatible avec la vie, car sans lui la Terre serait un désert glacé.
 Les étoiles rayonnent dans le visible car elles sont chaudes (3000 à 15000 K). La surface solaire à 6000 K émet dans le visible ; mais la couronne, 200 fois plus chaude (le million de K), rayonne à des longueurs d'onde 200 fois plus courtes, dans l'UV, que seuls les satellites peuvent observer (car l'atmosphère terrestre les arrête).

2 - Naissance des techniques d'observation du Soleil

Le Soleil et la Lune sont les premiers objets dont la lunette astronomique s'est emparée en 1610 ; puis la physique solaire est née de l'apparition de la photographie et de la spectroscopie dans la seconde moitié du XIX^{ème} siècle.

2.1 - Le XVII^{ème} siècle et les taches

Le « grand siècle » a joué un rôle majeur dans l'exploration du Soleil grâce à l'invention de la lunette. On a découvert les taches (ou confirmé leur existence, car des groupes de grosseur exceptionnelle semblent avoir été aperçus à l'œil nu) ; on a décrit leur forme, leur mouvement

apparent, leur répartition sur le disque, étudié la rotation solaire ; à partir de 1650 une anomalie est survenue (quasi absence de taches durant 50 ans) en même temps qu'un refroidissement climatique, dont l'explication n'est toujours pas établie.

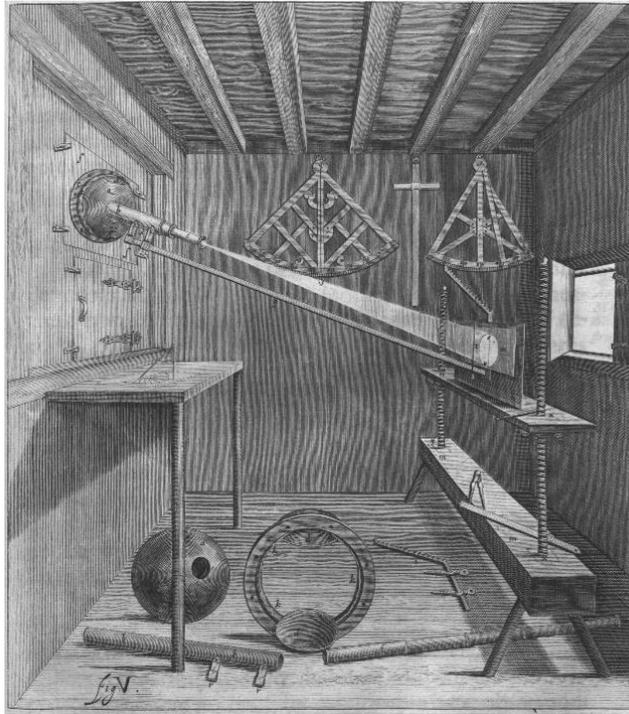
C'est le Roi Soleil qui a structuré le développement des sciences en France, sous l'impulsion de Colbert, par la création de l'Académie des Sciences en 1666, et qui a organisé l'astronomie, par la fondation de l'Observatoire de Paris en 1667.



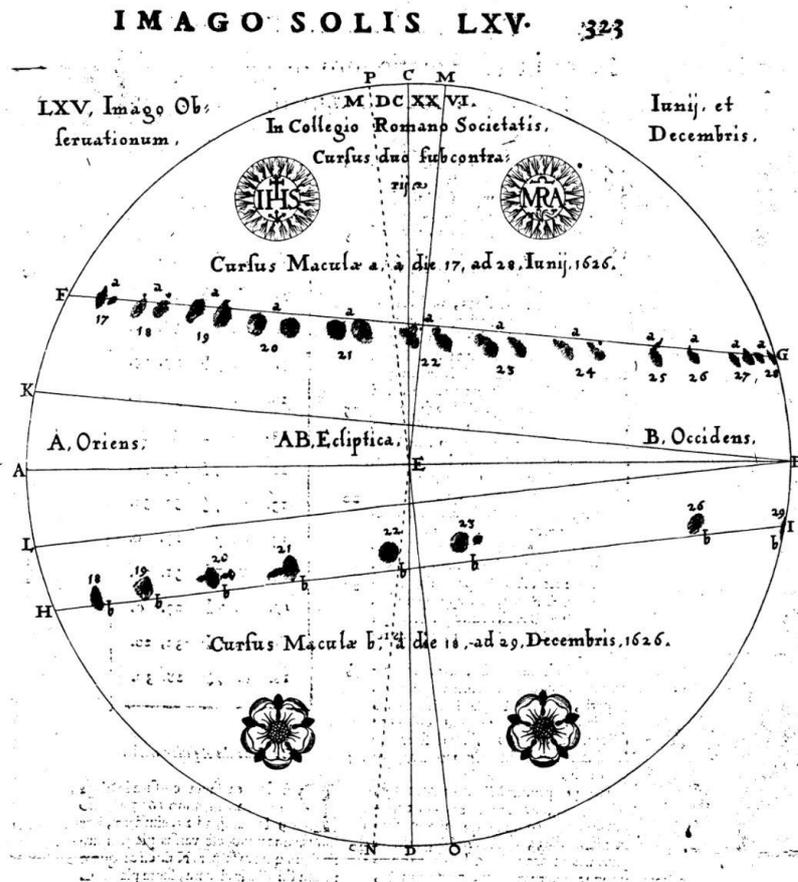
Colbert présente l'Académie des Sciences au Roi. Jean-Dominique Cassini (à la tête de l'Observatoire) est à gauche parmi les académiciens. Dans le fond, l'Observatoire Royal (architecte Claude Perrault). Peinture d'Henri Testelin (1616-1695). Château de Versailles. Wikimedia Commons.

Plusieurs astronomes eurent l'idée d'observer le Soleil à l'aide de la lunette de Galilée (1564-1642), mise au point en 1609, puis perfectionnée par Johannes Kepler (1571-1630). Ils s'intéressèrent aux taches, sujet de choix à la portée de ces lunettes. Il s'agit de Johannes Fabricius (1587-1616) en Hollande, Thomas Harriot (1560-1621) en Angleterre, Galilée en Italie, Christoph Scheiner (1575-1650) en Allemagne et Johannes Hevelius (1611-1687) en Pologne. Harriot aurait effectué la première observation des taches solaires en Décembre 1610. Fabricius comprit que la dérive des taches d'un jour à l'autre (décalage moyen de 13° par jour) était dû à la rotation du Soleil sur lui-même. Néanmoins, ce sont Galilée, Scheiner et Hevelius qui furent les plus assidus dans les observations des taches. Galilée démontra que les taches sont bien des structures solaires, et ne peuvent être attribuées au transit de planètes intérieures passant entre le Soleil et la Terre. Le Soleil étant très lumineux, il convenait de prendre des précautions pour ne pas se brûler les yeux : on observait les taches par projection sur un écran en papier sur lequel on dessinait. Ces instruments étaient appelés « machines héliotropiques » par Hevelius, qui compte 4000 journées d'observations entre 1642 et 1684.

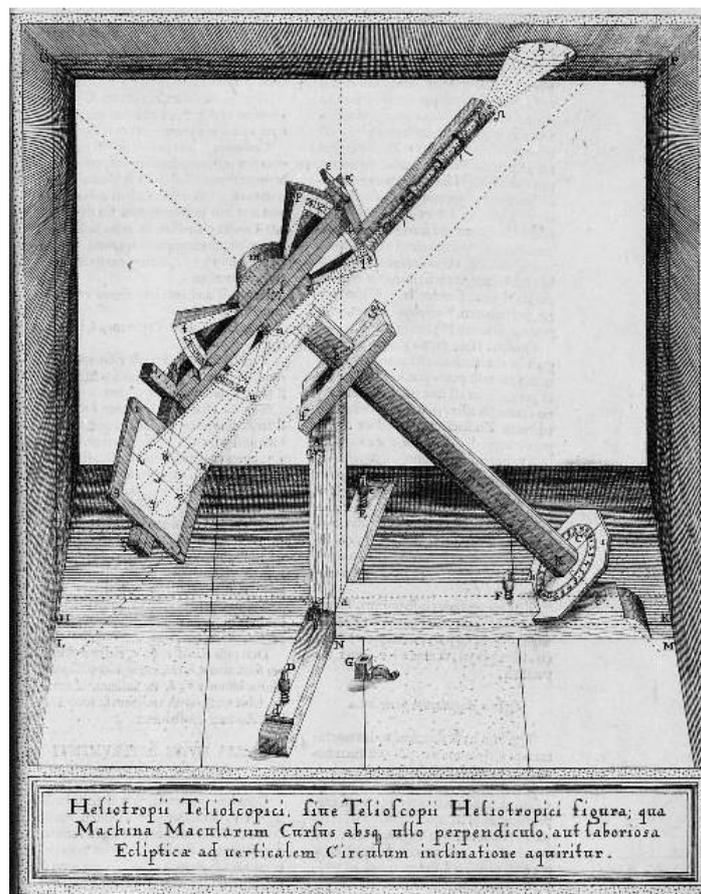
Christoph Scheiner a décrit les variations des trajectoires des taches en fonction de la saison d'observation, qui résulte d'effets géométriques de projection sur le ciel, liés à l'inclinaison de l'axe des pôles terrestres sur le plan de l'écliptique (23.5°) et à celle de l'axe des pôles solaires (7°). Ses dessins montrent que la trajectoire des taches n'est pas rectiligne mais incurvée, matérialisant des parallèles imaginaires sur la surface solaire. Scheiner a aussi inventé la monture équatoriale, permettant de suivre le mouvement des astres en n'agissant que sur un seul axe pour compenser la rotation de la Terre. C'est un progrès par rapport au montage présenté par Hevelius où il fallait agir simultanément sur deux axes pour maintenir l'image solaire fixe au foyer de la lunette.



Télescope héliotropique d'Hevelius (1611-1687) présenté dans son ouvrage « *Machinae Coelestis* » (1673, numérisation Carnegie Mellon) : il s'agit d'une lunette dont l'oculaire est tiré pour fonctionner en objectif de projection sur écran.



Observations de Juin et de Décembre 1626 reportées sur le même dessin par Scheiner dans son ouvrage « *Rosa Ursina* » (1630, numérisation Gallica/BNF).



Télescope héliotrope de Scheiner, l'ancêtre des montures équatoriales (« Rosa Ursina », 1630, Gallica/BNF) ; elle supporte une lunette par projection qui permettait de dessiner les taches.

En France, la fondation de l'Observatoire de Paris va contribuer à l'essor de l'observation astronomique en rassemblant les talents de l'époque. Jean-Dominique Cassini (1625-1712), invité par Colbert à la tête de l'Observatoire sur recommandation de l'Abbé Jean Picard (1620-1682), académicien, organise les observations.

La création de l'Observatoire va s'avérer extrêmement féconde car elle va donner naissance à des instruments de mesure dont la précision était inconnue jusqu'alors. Adrien Auzout (1622-1691) met au point l'oculaire micrométrique à fils et Christian Huygens (1629-1695) des horloges précises à la seconde près sur 24 heures.

En 1672, Jean-Dominique Cassini et Jean Richer (1630-1696) réalisent une prouesse : ils déterminent à 10% près la distance du Soleil à la Terre en profitant d'une opposition de la planète Mars (alignement parfait Soleil Terre Mars). Les deux observateurs mesurent simultanément la position angulaire de Mars depuis Paris et Cayenne. L'écart permet le calcul de la distance Terre Mars. A partir de cette valeur, la troisième loi formulée en 1618 par Kepler leur permet de calculer la distance Soleil Terre. Ils trouvent 130 millions de km, valeur proche des 149,6 actuels !

Isaac Newton (1643-1727) découvre en 1666 à l'aide d'un prisme que la lumière blanche est en fait la superposition d'une infinité de radiations colorées (explication de l'arc en ciel). On lui doit aussi l'invention du télescope à miroirs (1672) universellement utilisé aujourd'hui. Mais surtout, Newton énonce la loi de la gravitation universelle, dans laquelle la force d'attraction entre deux corps est proportionnelle au produit de leur **masse** et inversement proportionnelle au carré de leur distance. Mathématicien brillant, il parviendra en 1687 à démontrer les lois empiriques de Kepler, ce qui permettra d'évaluer la masse du Soleil. Le calcul est présenté dans « Principia Mathematica ». Il partit du principe que le mouvement d'une planète résulte d'un équilibre entre la force centrifuge du mouvement orbital et l'attraction solaire.

La loi de la gravitation universelle de Newton

La force F d'attraction entre deux corps de **masse** m et M s'exprime sous la forme :

$$F = G m M / d^2$$

où G est la constante d'attraction universelle et d la distance entre les deux corps. Cette constante ($6.67 \cdot 10^{-11}$) a été mesurée avec précision en 1798 par Henry Cavendish (1731-1810).

La force a pour direction la droite qui joint les deux corps.

A la surface d'un astre, cette force porte le nom de **poids** : un objet de masse m possède un poids $P = m g$ où g désigne l'accélération de la pesanteur (9.81 m/s^2 sur Terre, 275 m/s^2 sur le Soleil).

Les lois de Kepler

Les planètes du système solaire décrivent une ellipse dont le Soleil est le foyer. Si a désigne le demi grand axe de l'ellipse et T la période de révolution autour du Soleil, le rapport T^2/a^3 est une constante commune (proportionnelle à la masse du Soleil). Ainsi, plus les planètes sont loin du Soleil, et plus leur période est longue puisqu'elle varie selon la puissance $3/2$ de la distance.

Distance angulaire et distance linéaire

Les astronomes mesurent sur le ciel des distances angulaires entre deux objets (petit angle α égal à une fraction de radian), et non des distances linéaires (d en kilomètres). Si l'on connaît la distance D des objets à la Terre, ces quantités sont liées par la relation $\alpha \approx \tan(\alpha) = d / D$

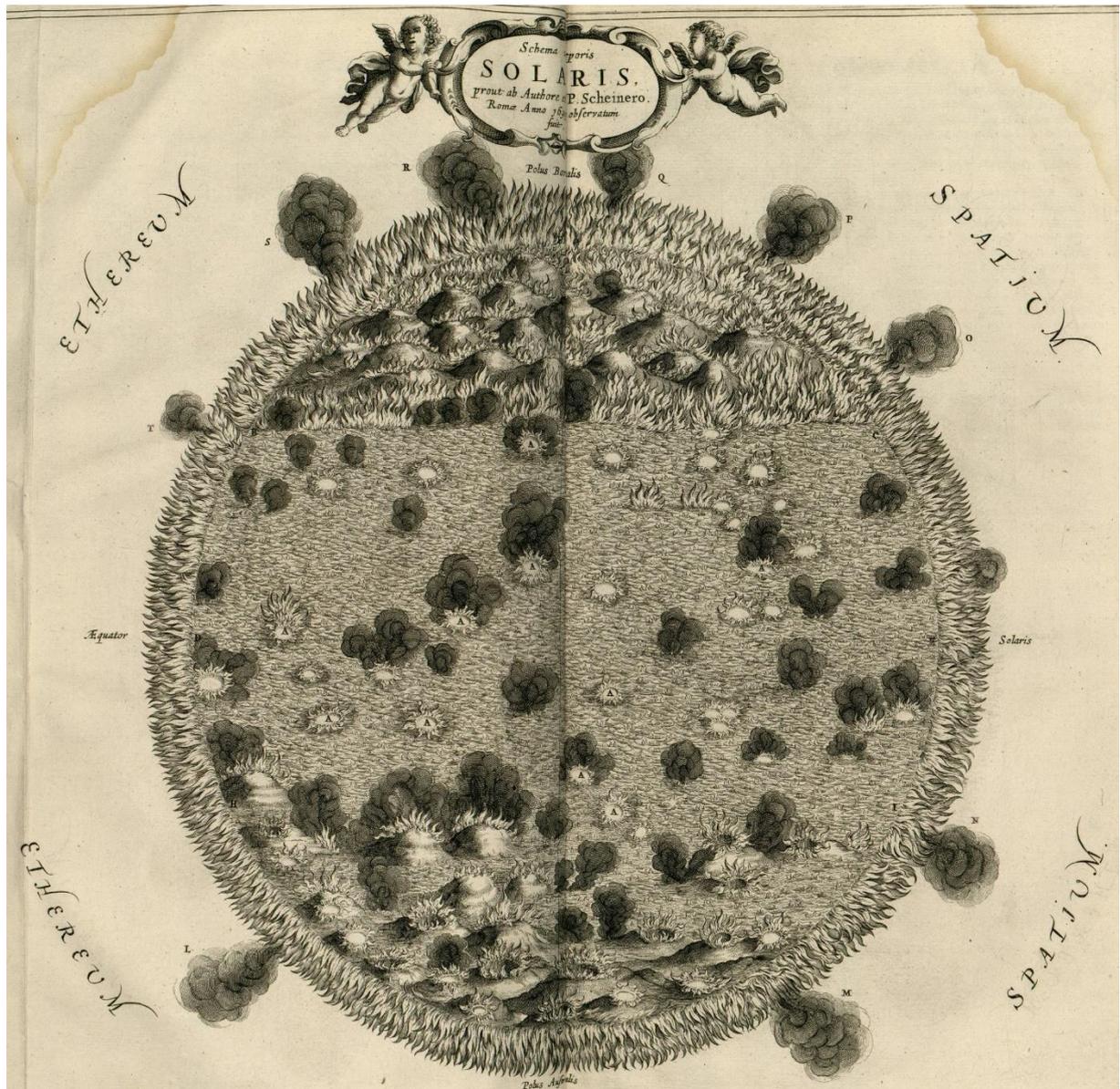
A l'Observatoire de Paris, Jean Picard s'emploie à réaliser des observations du diamètre angulaire solaire, ce qui permet d'évaluer le diamètre linéaire de l'étoile (en km) connaissant la distance Soleil Terre. C'est le début d'une nouvelle ère : la lunette, instrument d'imagerie, va devenir un instrument de mesure de position. Picard utilise en 1667 une lunette munie de l'oculaire micrométrique à fil mobile d'Adrien Auzout. Il parvient à faire des mesures à la seconde de degré près ($1/3600$ de degré), une précision fantastique pour l'époque. Il importait de connaître la dimension réelle de l'étoile et ses variations angulaires sur le ciel, dont on déduit l'excentricité de l'orbite de la Terre (nombre qui caractérise l'écart entre une ellipse et un cercle, et qui vaut actuellement 0.017). La mesure du diamètre solaire revêt encore une importance considérable, car ses infimes variations pourraient engendrer des fluctuations de luminosité de l'étoile (car proportionnelle à sa surface), donc avoir des répercussions climatiques sur Terre.

Philippe de la Hire (1640-1718) poursuit l'oeuvre de l'abbé Picard, mais il utilise une autre méthode, celle des passages ou des transits, qui se développe grâce au gain en précision des horloges à pendule de Huygens. La Hire peut ainsi chronométrer le temps de passage du Soleil au méridien (ce phénomène dure 2 minutes) avec une précision d'une demi seconde de temps, lui donnant une incertitude de quelques secondes de degré sur la valeur du diamètre solaire.

Michel Toulmonde a effectué en 1997 une compilation de toutes les mesures anciennes et a conclu que les écarts entre différents auteurs pourraient être fictifs et imputables à des biais instrumentaux mal connus et non corrigés. C'est qu'en réalité, les mesures du diamètre solaire pratiquées au sol, d'hier et d'aujourd'hui, sont très délicates en raison des perturbations de l'atmosphère terrestre, qui déforme et agite les images. C'est la raison pour laquelle on effectue désormais ce type de travail avec des instruments en orbite.

A la fin du XVII^{ème} siècle, une grande moisson d'observations de taches et de diamètres solaires a été obtenue : cette époque a fait éclore des techniques précises de mesures de positions, dites « astrométriques ». Mais il faudra attendre le XIX^{ème} siècle et l'accumulation d'un important

volume de données pour que la physique solaire, c'est-à-dire la science s'attachant à comprendre le fonctionnement du Soleil, se mette en place.



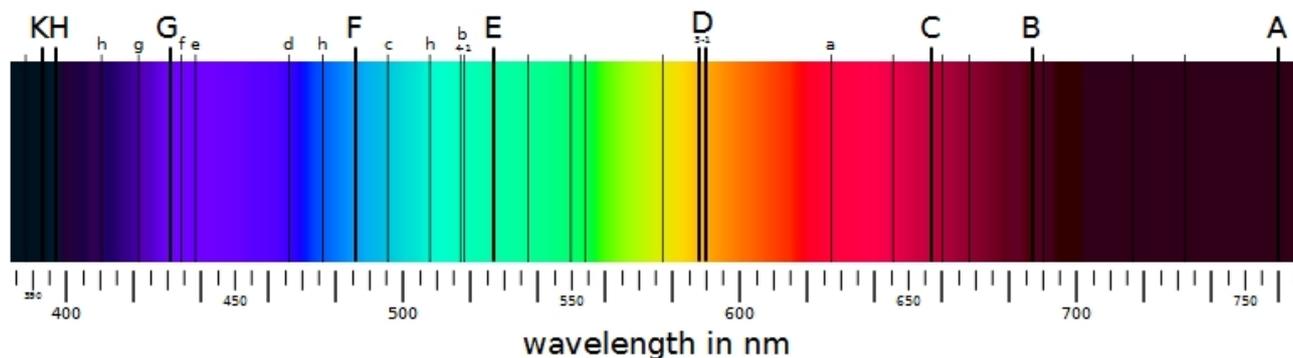
Une interprétation du Soleil selon Kircher (1602-1680) au XVII^{ème} siècle (Gallica/BNF, *Mundus Subterraneus*, 1664)

2.2 - Les grandes révolutions du XIX^{ème} siècle

Sur les traces de Newton, l'astronome anglais William Herschell (1737-1822) découvre en 1800 l'émission Infra Rouge (**IR**) du Soleil, de plus grande **longueur d'onde** que la lumière visible. Il constate une augmentation de température en plaçant un thermomètre au delà du secteur rouge de la lumière décomposée par un prisme : ce rayonnement invisible représente la moitié de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace.

L'allemand Joseph Fraunhofer (1787-1826) identifie en 1817 dans le **spectre** solaire des « bandes noires » appelées **raies** spectrales qu'il attribue aux transitions atomiques caractéristiques d'éléments chimiques présents dans l'atmosphère solaire, comme l'Hydrogène, le Sodium, le Magnésium, le Calcium, etc... On sait aujourd'hui qu'il existe des milliers de raies (*chapitre 2*) qui

sont autant de signatures des éléments présents dans l'enveloppe gazeuse qui entoure le Soleil, la photosphère et la chromosphère. Les raies coronales ont été mises en évidence plus tard lors des éclipses totales.



Spectre de Fraunhofer, montrant les raies les plus larges du spectre solaire (©Wikimedia Commons) ; A,B=Oxygène ; C=Hydrogène ; D=Sodium ; E=Fer ; b=Magnésium ; F,f,h=Hydrogène ; G=molécule CH ; K,H=Calcium ionisé

Les transitions atomiques

Selon la mécanique quantique, les niveaux d'énergie possibles des **électrons** autour du **noyau** de l'atome (constitué de **protons** et de neutrons) ne peuvent pas prendre n'importe quelle valeur mais sont discrets et quantifiés. Lorsqu'un électron soumis au rayonnement ambiant passe d'un niveau d'énergie E_1 à un autre plus élevé E_2 , la transition met en jeu une « particule de lumière » fictive de masse nulle appelée **photon**, qui est absorbée, et dont l'énergie vaut $h \nu = E_2 - E_1$ (relation de Planck, h est la constante de Planck $6.62 \cdot 10^{-34}$).

A ce photon, qui se déplace à la vitesse de la lumière $C = 300\,000$ km/s, est associé une **onde** de **fréquence** ν et de **longueur d'onde** $\lambda = C / \nu$; c'est la dualité onde corpuscule, idée émise par Louis de Broglie en 1924, et pour laquelle le prix Nobel de physique lui fut attribué en 1929.

Les transitions de l'électron de l'atome d'Hydrogène

Les niveaux d'énergie possibles de l'unique **électron** de l'atome d'Hydrogène sont donnés par la loi $E(n) = -R / n^2$

n est le numéro du niveau : 1, 2, 3 ... jusqu'à l'infini. R est la constante de Rydberg.

Lorsque l'électron passe du niveau m vers le niveau $n > m$, il absorbe un **photon** d'énergie $h \nu = E(n) - E(m)$, et on a une raie d'absorption.

Si l'électron passe du niveau m vers le niveau $n < m$, il émet un **photon** d'énergie $h \nu = E(m) - E(n)$, c'est une raie d'émission.

Dans le **spectre** visible, on voit la série de Balmer des transitions $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$ à 656, 486, 432, 410 nm de longueur d'onde, raies qui ont en commun le niveau 2 : elles sont désignées sur le spectre de Fraunhofer par les lettres C, F, f, h.

Claude Pouillet (1790-1868) effectue en 1838 une tentative d'évaluation de la « constante » solaire ou énergie reçue par mètre carré de surface terrestre. Son pyrhéliomètre est constitué d'un volume d'eau tourné vers le Soleil et capoté de noir dont il mesure l'échauffement à l'aide d'un thermomètre. Cela conduira à la première estimation de la température de surface du Soleil, et par là de sa luminosité connaissant son rayon. La « constante » solaire est voisine de 1361.8 W/m² et porte mal son nom, car elle est sujette à de faibles fluctuations (0.1%) en liaison avec l'activité solaire.

Le cycle d'activité solaire de 11 ans (*chapitre 2*), caractérisé par une variation périodique du nombre de taches présentes sur le Soleil, est découvert en 1843 par l'astronome allemand Heinrich Schwabe (1789-1875), en compilant les données acquises depuis plus de cent ans.

L'anglais Edward Maunder (1851-1928) remarque le profond déficit de taches solaires dans les observations du cours de la seconde moitié du XVII^{ème} siècle sous le Roi Soleil. On constate un refroidissement durant cette période (dite du « minimum de Maunder »), mais ayant commencé bien avant ; c'est le « petit âge glaciaire » en climatologie de 1300 à 1850 environ. Il est possible qu'il y ait une corrélation avec le niveau anormalement faible de l'activité solaire, mais cette supposition reste controversée.

En 1852, Edward Sabine (1788-1883), qui s'intéresse à l'activité géomagnétique terrestre, c'est à dire aux fluctuations du champ magnétique de la Terre, trouve une corrélation étroite et quasiment parfaite avec le cycle solaire de Schwabe. L'environnement terrestre serait-il ainsi soumis aux fluctuations de notre étoile ? Sabine a mis le doigt sur une discipline actuellement en plein renouveau, qu'on appelle « météorologie spatiale » ou encore science des interactions entre le Soleil et la Terre. Les enjeux dépassent largement ceux de la connaissance fondamentale pour entrer dans le champ des applications économiques et sociétales : l'activité solaire (*chapitre 3*) peut perturber les lignes à haute tension, les télécommunications, dégrader les satellites, affecter la santé des personnels navigants soumis aux rayonnements ionisants.

Richard Carrington (1826-1875) observe pour la première fois, en 1859, une éruption solaire, sans doute la plus puissante jamais rapportée, dans un centre actif composé de taches. Les éruptions solaires (*chapitre 3*) sont des éjections de gaz ionisé liées à des instabilités d'origine magnétique. Ces phénomènes sont la clef des relations entre le Soleil et la Terre. Carrington, grâce à ses milliers d'observations de taches, a compris que le Soleil ne tourne pas sur lui même comme un corps solide, mais présente une rotation plus rapide à l'équateur (26 jours) qu'aux pôles (31 jours) : c'est la rotation différentielle.

2.2.1 Première révolution, la photographie céleste

Hippolyte Fizeau (1819-1896) et Léon Foucault (1819-1868) vont changer durablement l'Astronomie pendant plus de cent ans jusqu'à l'apparition des caméras numériques modernes (matrices photo sensibles de type CCD ou CMOS). Il réalisent le premier daguerréotype du Soleil en 1845. Dès lors, la perception de l'objet astronomique, en passant progressivement du dessin à la photographie, va s'affranchir de la subjectivité de l'observateur et permettre la conservation d'une information fidèle, exempte d'interprétation, à l'usage des générations futures. Cet immense pas va se conjuguer aux progrès de la spectroscopie qui va révéler les messages transmis par la lumière. L'alliance de ces deux techniques sera le moteur de l'astronomie physique, qui deviendra astrophysique au XX^{ème} siècle.

2.2.2 Seconde révolution, la spectroscopie

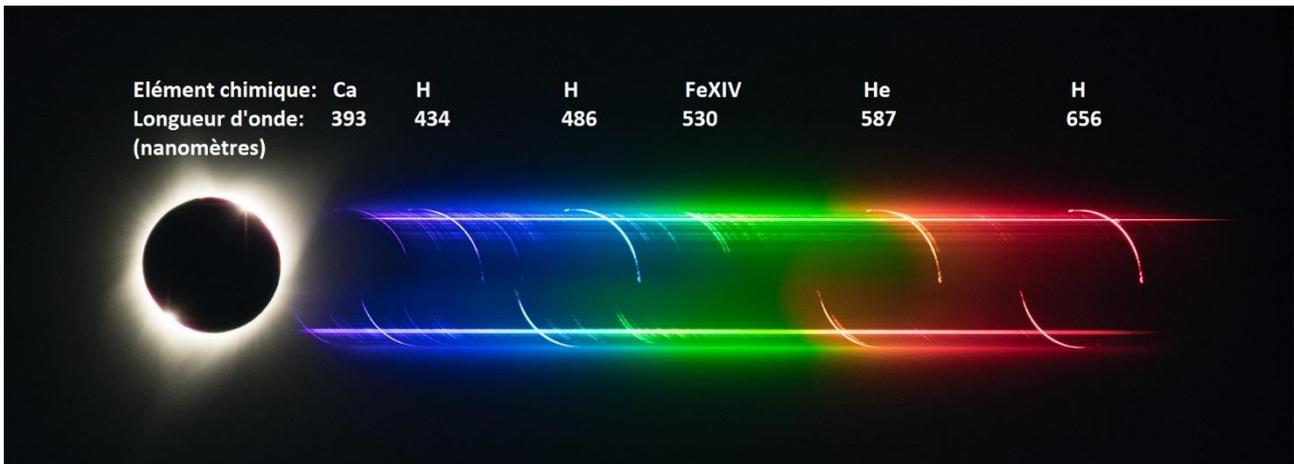
Le 18 Août 1868, jour d'une éclipse totale de Soleil par la Lune, on assiste à un véritable triomphe de la spectroscopie. Lors de l'éclipse, les astronomes Jules Janssen (1824-1907) et Norman Lockyer (1836-1920) aperçoivent des protubérances (*chapitre 3*) au delà du limbe solaire. Ces objets, constitués d'Hydrogène, apparaissent naturellement en rouge/rose – la lumière émise par la raie H α à 656.3 nm - lors des éclipses, alors qu'elles sont noyées dans la lumière de l'astre le reste du temps, donc invisibles. Après l'éclipse, Janssen et Lockyer pointent leur spectroscope dans leur direction et les retrouvent ! Ils montrent ainsi qu'on peut observer les protubérances en tout temps, en isolant leur émission dans le spectre solaire. Cette découverte fondamentale est à l'origine d'une collection centenaire de clichés solaires à l'Observatoire de Meudon.



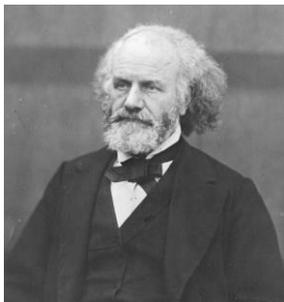
Janssen et Lockyer démontrent la possibilité d'observer les protubérances hors éclipse grâce à la spectroscopie (OP, sauf l'image centrale en lumière naturelle obtenue par l'IAP/CNRS en 1999). Les protubérances sont depuis observées quotidiennement à Meudon grâce à la spectroscopie.

Lors de cette éclipse, une seconde découverte majeure est attribuée aux mêmes observateurs. Ils orientent le spectroscopie dans la direction de la basse couronne solaire, qui apparaît lors des éclipses comme une vaste auréole de lumière blanche. Une raie jaune brillante, inconnue jusqu'ici, apparaît dans le spectre, à la longueur d'onde de 587.6 nm, au voisinage des deux raies du Sodium identifiées par Fraunhofer. Il s'agit d'un nouvel élément, que l'on décide de baptiser Hélium (du grec Hélios pour Soleil). C'est donc dans le Soleil que ce gaz, second constituant de l'Univers après l'Hydrogène, a été trouvé.

Un an plus tard, lors de l'éclipse du 7 Août 1869, l'astronome américain Thomas Young (1834-1908) constate qu'une autre raie inconnue apparaît dans le vert, à 530.2 nm de longueur d'onde, dans la basse couronne. Or il n'y a aucune raie à cet endroit dans le spectre du disque solaire ! C'est donc une nouvelle surprise : Young a vu une raie dite « interdite » de la couronne solaire (« interdite » parce qu'on ne peut l'observer que dans des milieux extrêmement dilués et chauds, dans des conditions non reproductibles en laboratoire). Ne sachant identifier cette raie, il l'attribue à un nouvel élément qu'il nomme « Coronium ». Il faudra attendre 70 ans pour comprendre que cette raie verte n'est autre que la signature d'atomes de Fer 13 fois ionisés (c'est à dire auxquels on a arraché 13 électrons, la moitié du cortège). Ce phénomène impose à la couronne d'être très chaude : une température supérieure au million de degrés. On a constaté depuis la présence d'autres raies « interdites » provenant d'atomes hautement ionisés, qui témoignent des conditions extrêmes qui règnent dans la couronne.



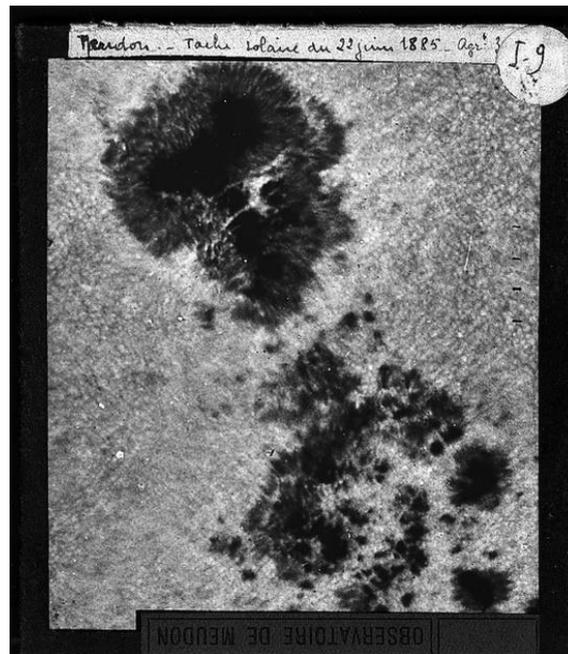
Découverte de l'Hélium et des raies interdites dans la couronne solaire : la raie verte du « Coronium » à 530.2 nm et la raie jaune de l'Hélium à 587.6 nm constituent une grande victoire de la spectroscopie au XIX^{ème} siècle (ce bel exemple de « spectre éclair » a été obtenu par Yujing Qin, Université d'Arizona, éclipse du 21 Août 2017 aux USA)



Jules Janssen (1824-1907), académicien, est le fondateur de l'Observatoire de Meudon (1876) et le père de l'Astrophysique française. Alors que l'Astronomie au XIX^{ème} siècle s'intéressait surtout au mouvement des astres et à la mécanique céleste, Janssen y introduit la physique, l'objectif étant de comprendre la nature, l'origine et l'évolution des corps composant l'Univers. Grâce à la spectroscopie, il découvre l'Hélium avec Norman Lockyer et la possibilité d'observer les protubérances en dehors des éclipses. Il inventa le revolver photographique pour observer le passage de Vénus de 1874 devant le Soleil, ancêtre du cinématographe (©OP).

2.3 L'épopée du Mont Blanc et le spectre solaire

Les découvertes de l'Hélium et des raies « interdites » de la couronne vont entraîner une accélération de l'étude de l'atmosphère du Soleil. Cette activité est impulsée par Jules Janssen à l'Observatoire fondé en 1876 sur le domaine de Meudon, laissé en friche par l'armée. Janssen y développe l'imagerie de la surface solaire à haute résolution (collection de 5000 clichés) et y introduit la spectroscopie avec son collaborateur Henri Deslandres (1853-1948) qui prendra ensuite la direction de l'établissement. Grâce à la photographie, nous avons conservé une mémoire fidèle des différentes étapes dans la progression des connaissances.



L'une des premières photographies des taches (1885) sur plaque de verre à Meudon (©OP)

Janssen complète les installations de Meudon par une station d'altitude peu banale au sommet du Mont Blanc. Il souhaite profiter de l'altitude exceptionnelle du site pour séparer du spectre solaire la composante tellurique. En effet, le spectre solaire observé au sol mêle les raies des éléments chimiques présents dans l'atmosphère terrestre (oxygène, azote, vapeur d'eau) à celles formées dans l'atmosphère solaire : en s'élevant à haute altitude, les raies telluriques s'effacent devant les raies solaires, ce qui permet d'identifier l'origine de chaque élément. L'observatoire du Mont Blanc, constitué de deux niveaux dont l'un enfoui dans les glaces du sommet, était pourvu d'une tourelle météorologique, d'une grande lunette polaire de 30 cm d'ouverture, et d'un spectroscopie. Construit à Meudon, acheminé en pièces détachées par des porteurs, il fut utilisé de 1893 à 1909, puis démantelé, car disloqué par la pression glaciaire. La tourelle subsiste au musée alpin de Chamonix.



Surprise pour les alpinistes de 1900 au Mont Blanc ! L'Observatoire (1893-1909) créé par Janssen pour étudier le spectre solaire trône fièrement sur la calotte sommitale (©OP)

3 - Instruments contemporains

Ils se classent en deux catégories : ceux dédiés à l'observation du disque Solaire entier, au jour le jour, pour suivre l'évolution globale de l'activité ; et ceux à champ de vue restreint (un centième du disque solaire), destinés à des études détaillées à haute résolution spatiale sur programme de recherche spécifique. Au sol ou dans l'espace, toutes les longueurs d'onde du spectre électromagnétique sont mises à contribution pour comprendre le Soleil.

La résolution ou le pouvoir séparateur d'un télescope

La résolution spatiale d'un instrument représente la dimension angulaire des plus petits détails discernables sur le ciel, donc la finesse de l'image. Elle est d'autant meilleure que le diamètre de l'instrument est grand et la longueur d'onde d'observation petite. Par exemple, un télescope d'un mètre d'ouverture peut voir des détails de 0.15 secondes de degré, soit 100 km, sur la surface solaire, dans le vert. Cependant, la résolution est limitée au sol par les effets de la turbulence de l'atmosphère terrestre, forte en plaine, atténuée en montagne.

En ondes radio, pour voir les mêmes détails, il faudrait un télescope un million de fois plus grand, c'est-à-dire de 1000 km de diamètre ! C'est évidemment impossible ; cependant, on sait obtenir des images satisfaisantes en répartissant sur une base de l'ordre du km plusieurs dizaines d'antennes de taille raisonnable (quelques mètres ou dizaines de mètres) que l'on couple par une méthode appelée « interférométrie ». La résolution des images devient alors équivalente à celle d'un télescope unique dont la taille serait voisine de la base sur laquelle sont réparties les antennes.

3.1 – Les observations systématiques du Soleil

Henri Deslandres met au point un instrument original, le spectrohéliographe, qui est entré en exploitation quotidienne en 1909. Il a servi (et sert encore après maintes modernisations) à produire une collection d'images monochromatiques unique au monde, sur 10 cycles solaires consécutifs, de la photosphère et de la chromosphère. Le dispositif était novateur car d'une sélectivité exceptionnelle, prélevant la lumière dans un intervalle spectral bien plus étroit que ne pouvaient le faire les filtres optiques de l'époque. Ces images répondent aujourd'hui à deux objectifs : scientifique, pour étudier la cyclicité solaire (*chapitre 2*), et appliqué, en termes de prévision et de suivi des perturbations de l'environnement spatial de la Terre sous l'influence des éruptions solaires (*chapitre 3*). George Hale (1868-1938) eut la même idée aux Etats Unis et développa un appareil similaire.

D'autres observations systématiques de surveillance du Soleil sont pratiquées en France, au Pic du Midi (CLIMSO) et sur le plateau de Calern (Côte d'Azur) en optique, et à Nançay en radio (Radiohéliographe et antenne ORFEES).

Les images quotidiennes de ces instruments sont ici :

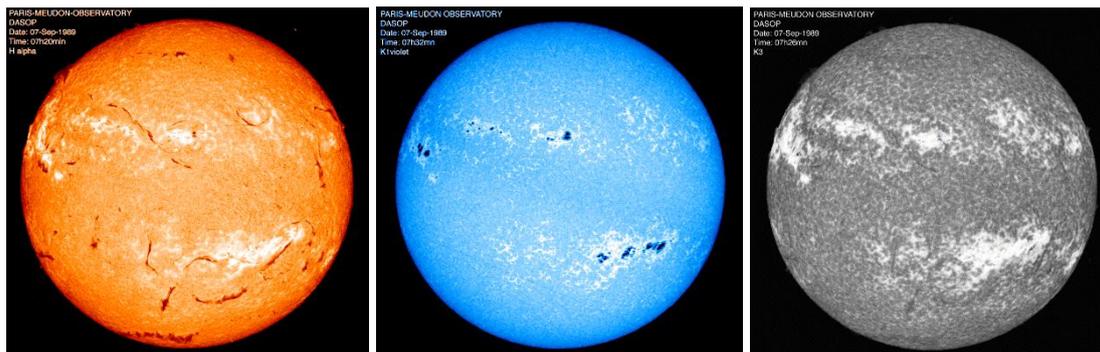
<http://bass2000.obspm.fr>

ou encore ici :

<https://observations-solaires.obspm.fr/>



Le spectrohéliographe est alimenté par un système à deux miroirs appelé coélostat, comportant un miroir mobile qui suit le Soleil dans son mouvement diurne et compense la rotation terrestre (©OP).



L'Observatoire de Meudon surveille l'activité solaire grâce au spectrohéliographe, à raison d'une série d'images par jour lorsque les conditions météo le permettent. Ce sont des images monochromatiques, isolant une raie du spectre solaire. Selon la raie sélectionnée (à gauche Hydrogène, au milieu et à droite Calcium), on découvre des aspects différents de l'atmosphère solaire, correspondant à plusieurs profondeurs de vision. Plus de 120 000 clichés ont été pris en 110 ans d'observations (©OP).



Henri Deslandres (1853-1948), académicien, spécialiste de spectroscopie et inventeur du spectrohéliographe, est convaincu que la physique et la chimie vont renouveler l'astronomie. Il rejoint Janssen à Meudon, auquel il succédera en 1907 à la tête de l'Observatoire. Il contribue au développement de l'Astrophysique et prend en 1926 la direction des observatoires de Paris et de Meudon réunis en une seule entité administrative (©OP).

Qu'est ce qu'une image monochromatique ?

Une telle image est formée en sélectionnant dans le spectre électromagnétique une fenêtre très étroite en longueur d'onde. En général, la fenêtre est positionnée sur une raie d'un atome caractéristique du milieu à étudier. Pour enregistrer ces images, inutile d'avoir une caméra couleur ! On utilise des capteurs sensibles seulement à l'intensité lumineuse. Une coloration artificielle (fausses couleurs) est souvent appliquée pour des raisons mnémoniques. Les images du Soleil à Meudon, dans la raie H α de l'Hydrogène à 656.3 nm, isolent une fenêtre de 0.02 nm de largeur spectrale. Le résultat est ensuite teinté en orange par ordinateur. Sans cette sélectivité, les structures solaires (hormis les taches) n'apparaîtraient pas. Les filtres de Charles Fabry et Alfred Pérot, ou de Bernard Lyot, apparus plus tard, ont des performances proches.

Les filtres monochromatiques sélectifs

Le filtre de Lyot, dont les principes ont été décrits en 1933, est basé sur l'interférence de l'onde ordinaire et de l'onde extraordinaire à la sortie d'un cristal biréfringent comme le spath d'Islande (ou la calcite). Un tel filtre est constitué de plusieurs étages en série. Le filtre de Fabry Pérot repose sur l'interférence d'ondes multiples à l'intérieur d'une cavité fermée par deux lames à faces parallèles partiellement réfléchissantes. Ces deux types de filtres sont très employés en Astronomie. Les lunettes H α pour amateurs utilisent souvent un petit Fabry Pérot de largeur spectrale comprise entre 0.05 et 0.1 nm.

3.2 - Que nous apportent les éclipses totales de Soleil ?

Lors d'une éclipse totale de Soleil, la Lune s'interpose parfaitement entre le Soleil et la Terre, et recouvre totalement le disque solaire. Cette occultation, très rare en un point donné du globe, ne dure jamais plus de quelques minutes. Elle fut jusqu'à l'ère des télescopes spatiaux le seul moyen d'apercevoir la couronne solaire, enveloppe ténue du Soleil composée d'électrons, ions et poussières, qui raccorde son atmosphère au milieu interplanétaire. L'observation des éclipses permet d'étudier la couronne intermédiaire, comme le montre cette image composite de 2017, qui présente des grands jets d'électrons diffusant la lumière. Les satellites voient en permanence la basse (en UV) ou la lointaine couronne (en lumière blanche).

La couronne solaire est plusieurs millions de fois moins brillante que le disque solaire, elle n'est pas plus lumineuse que le bleu du ciel quand il est pur (sans poussières). C'est pourquoi elle est difficilement observable au sol ; les astronomes ont, dès que possible, embarqué leurs instruments sur les satellites pour l'étudier, car dans l'espace, le ciel est noir ! L'intérêt des éclipses a donc quelque peu décru depuis qu'on voit en permanence la couronne depuis l'espace.

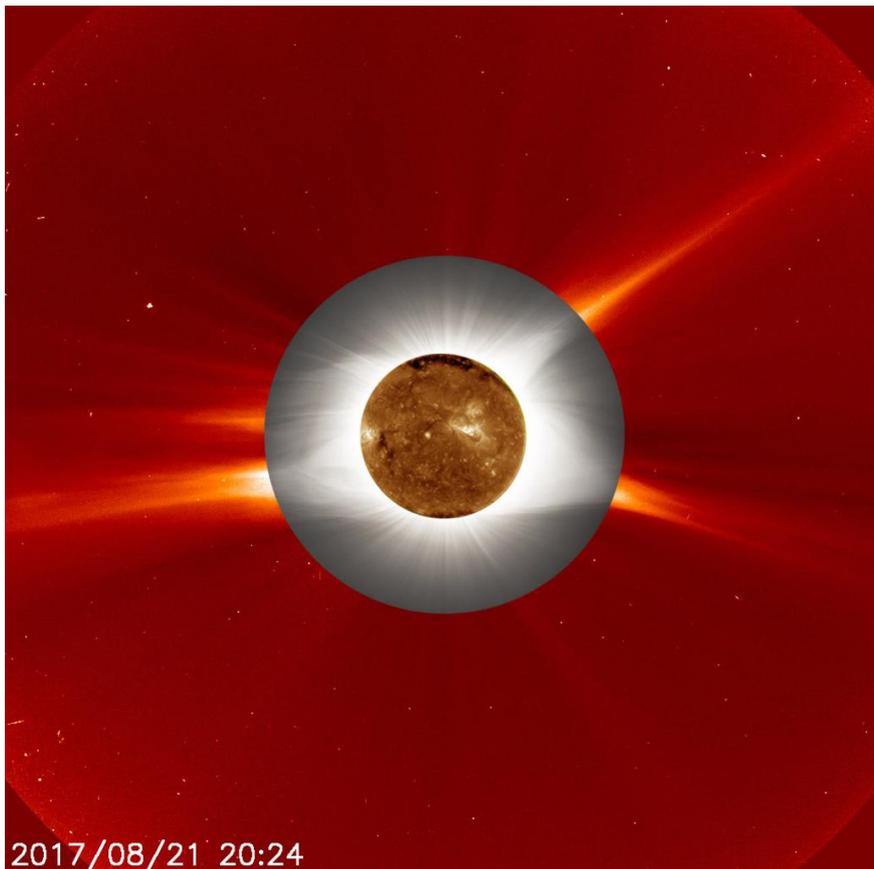
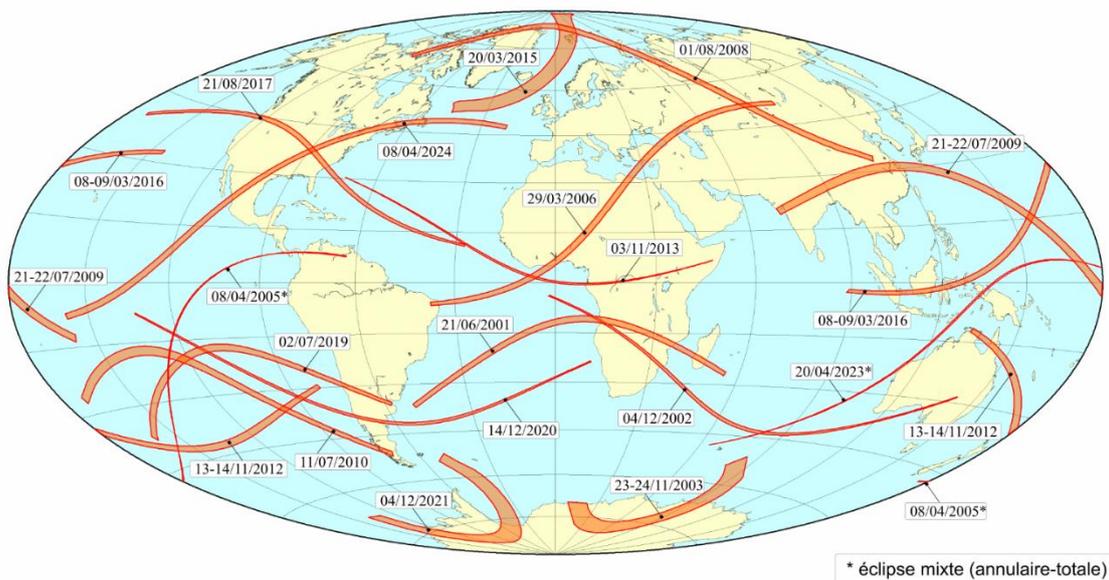


Image composite de la dernière éclipse totale du 21 Août 2017 aux USA ; le disque lunaire a été remplacé par une image UV du disque solaire (satellite SDO/NASA) ; la couronne solaire a grande distance a été observée par le télescope spatial SOHO/LASCO (ESA/NASA). La photo intermédiaire provient de l'expédition d'éclipse NSF/National Geographic. Document NASA.

Éclipses totales et mixtes de 2000 à 2025



Carte des éclipses totales dans le monde jusqu'en 2025 (IMCCE/OP). La prochaine éclipse totale aura lieu le 2 Juillet 2019 en Amérique du Sud. Les bandes oranges représentent la trajectoire de l'ombre sur la surface du globe. Elle se déplace à la vitesse de 2000 km/h. La dernière éclipse totale en France remonte au 11 Août 1999 ; la prochaine aura lieu le 3 Septembre 2081 !

3.3 – Le Soleil en optique à l’observatoire des Canaries

Les instruments européens de pointe, dédiés à l’observation détaillée des structures solaires dans le domaine visible et proche IR, sont situés à l’observatoire international des îles Canaries. Ce site espagnol a été choisi en raison de son ensoleillement et de la qualité des images qu’il fournit (turbulence atmosphérique modérée). Il existe deux observatoires, l’un à Tenerife près du volcan Teide, à 2350 m d’altitude, le second à La Palma, également au bord d’une caldeira à la même altitude. La France, l’Allemagne, les Pays Bas, la Suède y possèdent des instruments solaires spécialisés dans différents domaines. Le télescope suédois est optimisé pour l’imagerie à haute résolution spatiale ; l’instrument français est dédié à la spectroscopie et effectue des mesures des champs magnétiques et mouvements de la surface solaire. Ces télescopes nationaux, mis en service dans les années 1990, sont de la classe des « un mètre » ; leur successeur, prévu pour 2026, sera le fruit d’une large collaboration européenne.



Télescopes solaires sur le site de l’Observatoire du Teide à Tenerife ; au centre l’instrument français THEMIS du CNRS; à gauche les télescopes allemands (©OP).

3.4 – Le Soleil en radio à Nobeyama, Nançay, ALMA

Les radiotélescopes exploitent la seconde fenêtre de l’atmosphère terrestre transparente au rayonnement : la radio, qui va en astronomie des ondes millimétriques aux ondes décimétriques. Hormis les fenêtres visible et radio, notre atmosphère est opaque aux ondes électromagnétiques en provenance du cosmos. Les émissions radio du Soleil peuvent avoir des origines très diverses. Elles

Qu’est ce qu’un plasma ?

Il s’agit du quatrième état de la matière (les trois fondamentaux sont : solide, liquide et gazeux). Le plasma est un gaz ionisé, c’est-à-dire constitué non seulement d’atomes neutres, mais aussi d’**électrons** et d’**ions**. Un plasma reste globalement neutre (autant de charges positives que négatives) ; c’est un gaz conducteur dans lequel les particules chargées se déplacent sous l’action d’un **champ électrique** ou **magnétique**. On rencontre les plasmas dans des conditions extrêmes de température et de pression, rares sur Terre, mais courantes dans l’Univers (étoiles, haute atmosphère des planètes, aurores boréales, foudre, arcs électriques, machines à fusion expérimentales telles les tokamaks...)

prennent naissance dans le plasma de la couronne. Il peut s'agir d'un rayonnement naturel à la fréquence plasma électronique, mais aussi d'une émission liée à un mouvement accéléré ou décéléré d'électrons ou de protons lors des éruptions solaires, sous l'action de la **force de Lorentz** en présence de **champ électrique** ou **magnétique**. Toute charge en mouvement émet un rayonnement : dans un champ magnétique, il survient à la fréquence gyromagnétique.

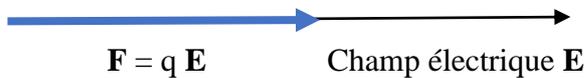
La fréquence gyromagnétique

Lorsqu'un électron spirale autour de la direction du **champ magnétique**, il décrit une hélice en tournant à la fréquence gyromagnétique $2.8 \cdot 10^{10} B$ Hertz, où B est l'intensité du champ magnétique (Tesla). Il émet alors un rayonnement radio, appelé cyclotron, dans la gamme de 10 à 3000 méga Hertz, selon la valeur du champ.

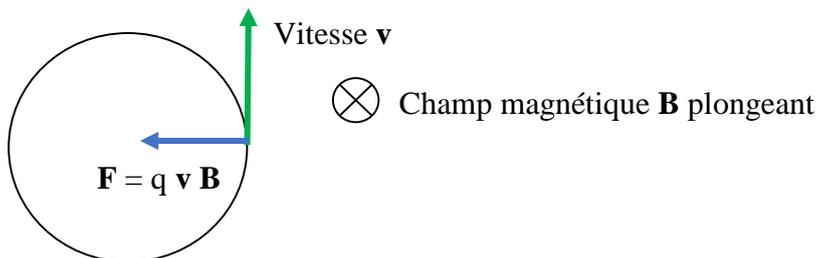
Le mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique et magnétique

Toute particule chargée, en présence de champ électrique ou magnétique, subit une force, appelée **force de Lorentz**. La composante électrique de la force est dans la direction du champ électrique ; celui-ci accélère ou freine les particules. La composante magnétique est orthogonale au mouvement ; le champ magnétique dévie les charges. Les accélérateurs de particules, comme le cyclotron ou le synchrotron, utilisent cette force qui alterne entre phases d'accélération et de déviation. Les éruptions solaires accélèrent les électrons et les protons, qui spiralent ensuite le long des lignes du champ magnétique en décrivant des hélices. Ce mouvement se matérialise par l'émission d'un rayonnement radio, dit rayonnement cyclotron.

Partie électrique de la force de Lorentz **F** agissant sur une charge q (positive ici) :

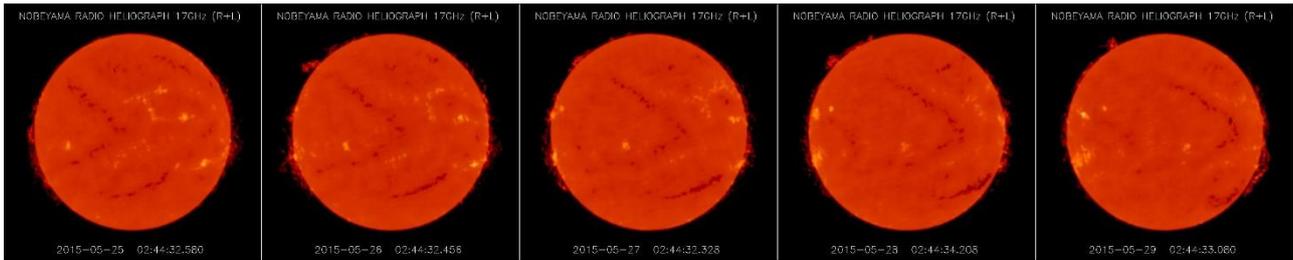


Partie magnétique de la force de Lorentz **F** agissant sur une charge q (positive ici) :



Toute particule chargée et accélérée rayonne

Les charges en mouvement accéléré (ou ralenti) rayonnent une **onde électromagnétique** dont l'intensité est proportionnelle au carré de leur accélération. Une charge qui tourne dans un champ magnétique possède une accélération proportionnelle au produit de sa vitesse par l'intensité du champ magnétique : c'est le rayonnement cyclotron. Lors d'un impact, c'est le rayonnement de freinage.



Observations du Soleil en ondes radio à 17 giga Hertz au radiotélescope de Nobeyama (Japon). On visualise à cette fréquence plasma la surface du Soleil (chromosphère) où l'on distingue les principales structures : longs filaments sombres et régions actives magnétisées brillantes. Images des 25, 26, 27, 28 et 29 Mai 2015 faisant apparaître la rotation solaire (©NAOJ).

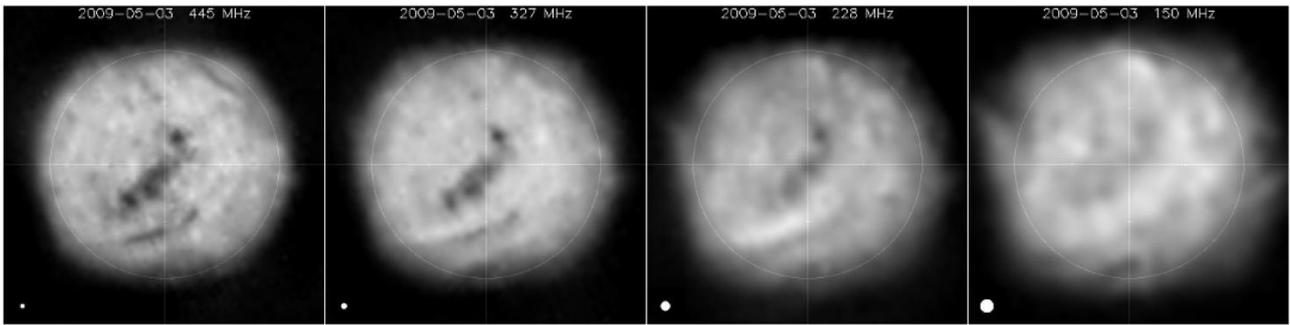
La fréquence plasma électronique

Un plasma comporte des atomes neutres et autant de charges positives que négatives. Les **électrons** sont les plus mobiles, car les plus légers. Lorsqu'un électron se déplace par rapport à sa position d'équilibre, un **champ électrique** local apparaît, et tend à le ramener à sa position initiale. Il en résulte une oscillation à la fréquence plasma, qui est proportionnelle à la racine carrée de la densité électronique n (nombre d'électrons par unité de volume) et vaut $9 \sqrt{n}$ Hertz. La fréquence plasma prend des valeurs très variables selon le milieu.

- Dans le Soleil, la densité électronique décroît avec l'altitude, il en est de même de la fréquence, ce qui fournit un outil pour explorer la stratification de l'atmosphère. La fréquence peut y varier de 100 méga à 100 giga Hertz.
- Dans l'ionosphère terrestre, couche à 100 km d'altitude, la fréquence est de 10 méga Hertz.
- Dans un métal, elle atteint 100 téra Hertz.



Radiotélescope de Nobeyama composé d'une centaine d'antennes alignées sur deux directions (©NAOJ). L'instrument a un pouvoir séparateur proche d'un télescope unique dont la taille serait voisine de l'alignement.



Observations multifréquences (445, 327, 228 et 150 MHz) à Nançay permettant de suivre la propagation d'évènements dans la couronne solaire (©OP). La fréquence diminue avec l'altitude.

Le radiohéliographe de Nançay est, comme celui de Nobeyama, un interféromètre composé de 47 antennes réparties en deux branches perpendiculaires formant un « T » : 19 antennes en Est Ouest réparties sur 3 km, et 25 antennes paraboliques en Nord Sud sur 2 km. Cet instrument est multifréquence : il observe sur plusieurs canaux entre 150 et 450 méga Hertz, et permet de suivre la propagation de faisceaux d'électrons accélérés lors des éruptions solaires. Les émissions dites de type III correspondent à une émission transitoire qui dérive des hautes fréquences vers les basses au fur et à mesure que le faisceau progresse. En effet, la fréquence plasma dépend de la densité électronique, qui décroît avec l'altitude.

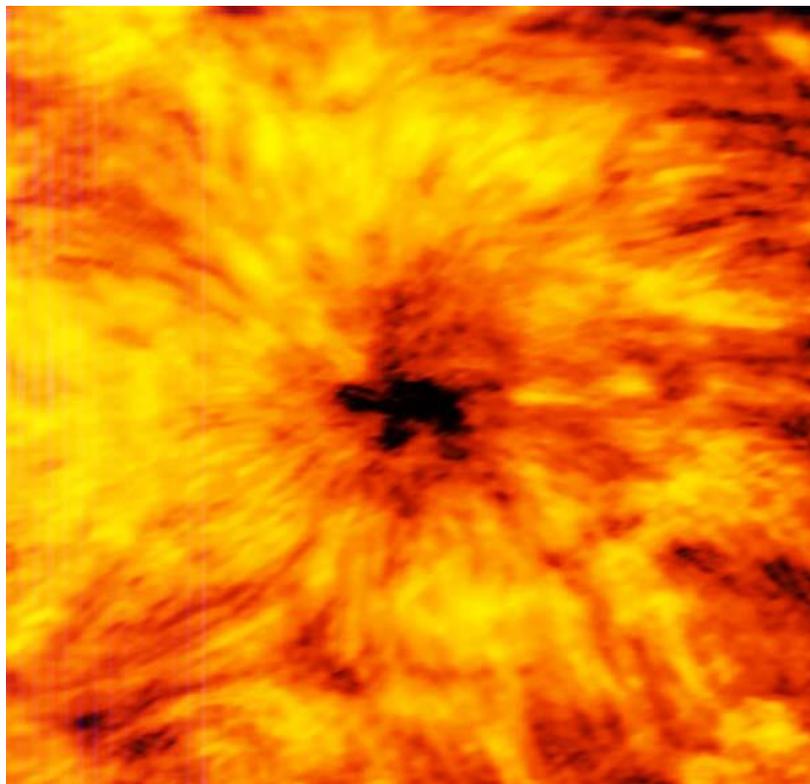


Radiohéliographe de Nançay composé de 47 antennes opérant dans la bande de fréquences radio de 150 à 450 méga Hertz, et délivrant des images de la couronne solaire (©OP).



Radiotélescope ALMA de l'Observatoire Européen Austral à 5000 mètres d'altitude dans le désert d'Atacama au Chili (©ALMA/ESO).

En 2013, le plus puissant radiotélescope européen jamais construit sous la forme d'un réseau d'antennes couplées, ALMA pour « Atacama Large Millimeter Array », est entré en service au Chili. Cet instrument n'est pas dédié à l'observation du Soleil, néanmoins il permet de faire des observations avec un **pouvoir séparateur** inédit, parce que ses antennes sont grandes, réparties sur un vaste espace, et captent des fréquences d'observations très élevées autour de 240 giga Hertz (1.25 mm de longueur d'onde). Les premières images solaires ont été obtenues en 2017 à cette fréquence, qui correspond à de fortes densités électroniques, dévoilant la structure profonde des taches.



Première observation radio en haute définition d'une tache solaire (photosphère) par ALMA en 2017 à la fréquence de 240 giga Hertz (©ALMA/ESO).

3.5 - Pourquoi observer depuis l'espace ?

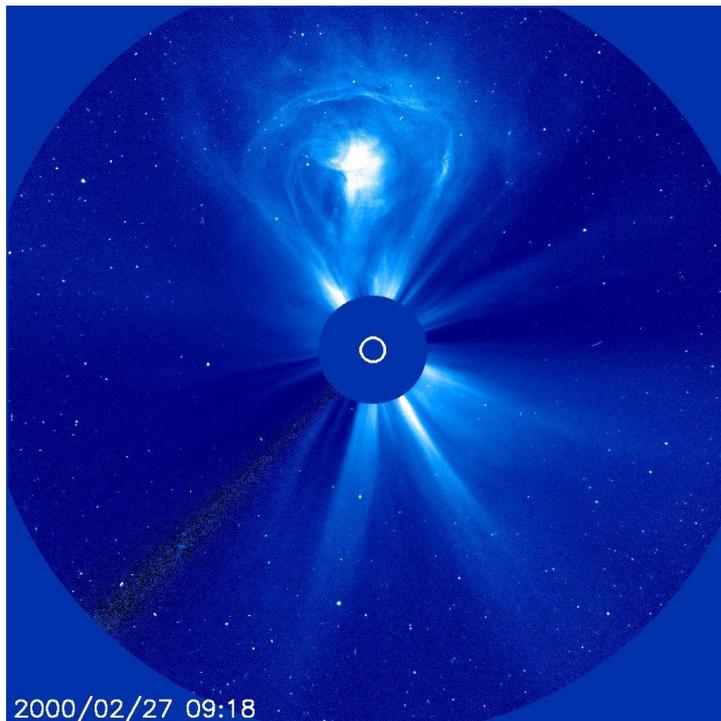
L'atmosphère terrestre gêne l'observation astronomique, parce qu'elle absorbe les rayonnements hormis le visible et la radio. En faisant obstacle aux rayons UV et X solaires, elle protège l'espace biologique terrestre. En réfléchissant le rayonnement IR de la Terre (c'est l'effet de serre), elle conserve une température propice à la vie. Pour observer les rayonnements éliminés par l'atmosphère, on a pensé aux ballons stratosphériques s'élevant à plusieurs dizaines de km, l'inconvénient étant la brièveté d'un vol. Audouin Dollfus (1924-2010) en fut précurseur en France (dès 1960), puis d'autres laboratoires épaulés par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES). Après les vols ballon éphémères, on s'est orienté vers l'espace et les satellites artificiels en orbite basse (200 km). La première grande moisson de données spatiales solaires en rayons UV et X revient au satellite Solar Maximum Mission (SMM) de la NASA dans les années 80. Cependant, les satellites en orbite basse (période de révolution de 90 minutes) ont souvent l'inconvénient des alternances jour nuit en passant dans l'ombre de la Terre. Il existe une position particulière du système Soleil Terre, dite point de Lagrange L1, situé entre le Soleil et la Terre, à 1.5 million de km de nous. Ce point, où les attractions des deux corps et la force centrifuge se compensent, autorise une observation 24 heures sur 24 du Soleil. En 1996, l'agence spatiale européenne (ESA) et la NASA placèrent SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) en L1. Incroyable épopée que SOHO ! Cet observatoire multi instruments fonctionne encore, 22 ans après son lancement, ce qui est exceptionnel ; il reste le seul capable d'observer la couronne solaire à grande distance grâce à ses deux coronographes. SOHO est maintenu actif par les agences pour étudier les interactions Soleil Terre et prévoir leur influence sur les activités humaines.

Les images en temps réel de SOHO sont ici : <https://sohowww.nascom.nasa.gov/>

Le coronographe est un instrument inventé par Bernard Lyot dans les années 30 et mis au point au Pic du Midi où il est parfois possible d'observer la basse couronne lorsque le ciel est pur (c'est-à-dire exempt de poussières qui diffusent la lumière). L'instrument masque le disque solaire avec une lune artificielle et est optimisé pour éliminer la diffusion lumineuse dans ses composants optiques. Au sol, on n'accède qu'à la couronne proche du bord solaire, un million de fois moins lumineuse que le disque. Mais la moyenne et haute couronne restent invisibles car moins brillantes que le ciel ! Observer dans l'espace change la donne : comme le ciel est noir, SOHO voit la couronne lointaine jusqu'à 30 rayons solaires, en gagnant un facteur cent mille par rapport à ce qui est possible de voir en montage !



SOHO pèse 2 tonnes et gravite autour du Soleil en synchronisme avec la Terre en un point particulier L1 à 1.5 millions de km de nous (©SOHO/ESA).



Ejection de masse vue au coronographe C3 de l'instrument LASCO sur SOHO. Le Soleil est indiqué par le cercle blanc ; le disque bleu autour est un occulteur anti éblouissement (une lune artificielle). Les points brillants sur le fond de ciel sont les étoiles de la Voie Lactée, notre galaxie (©SOHO/LASCO-ESA/NASA).



Bernard Lyot (1898-1952), académicien, fut astronome à l'Observatoire de Meudon. Il invente le coronographe, appareil permettant d'observer la couronne solaire en dehors des éclipses de Soleil par la Lune. Spécialiste de la polarisation de la lumière, il met au point le filtre monochromatique qui porte son nom. Les inventions de Lyot sont aujourd'hui mondialement utilisées. Victime d'une crise cardiaque, il décède prématurément au Caire à l'occasion d'une mission (©OP).

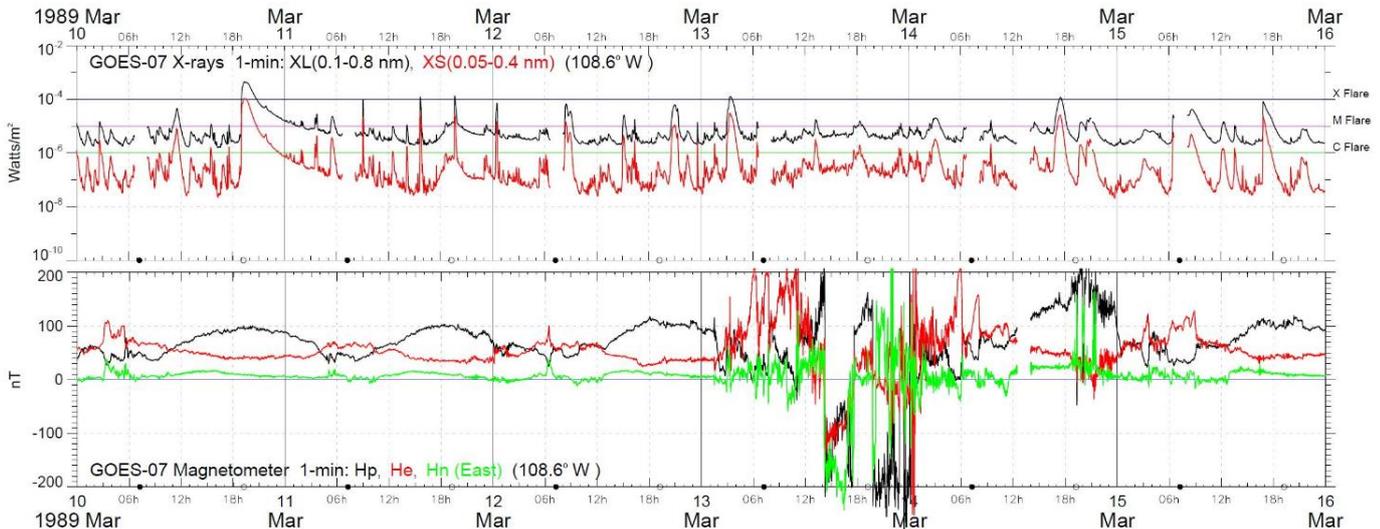
3.6 – GOES et la surveillance de l'environnement spatial

Depuis quelques décennies, la NASA et la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) surveillent l'environnement spatial de la Terre avec la série des satellites géostationnaires GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite). Ils sont situés à 36000 km d'altitude et ont pour vocation primaire la prévision météo à l'échelle du continent américain. Ils embarquent des instruments de mesure de l'environnement spatial in situ (densité de protons, d'électrons, magnétomètre) et des rayons X du Soleil. GOES cherche à détecter des

évènements liés aux éruptions solaires tels que celui ayant provoqué la grande panne électrique survenue au Québec en Mars 1989.

Le flux X solaire en temps réel observé par GOES est ici :

<http://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux>



Grande éruption du 10 Mars 1989 enregistrée par GOES 7, dont les effets sont parvenus à la Terre 3 jours plus tard. En haut, le flux de rayons X solaires (pic le 10 à 19 heures) dans deux bandes spectrales ; en bas, la perturbation des trois composantes du vecteur champ magnétique au niveau du satellite à 36000 km de la Terre est décalée dans le temps, car voyage plus lentement.

Un magnétomètre

C'est un appareil permettant de mesurer les 3 composantes locales du vecteur champ magnétique ; de nombreux satellites comme GOES en portent pour contrôler les perturbations du champ terrestre liées à l'activité solaire.

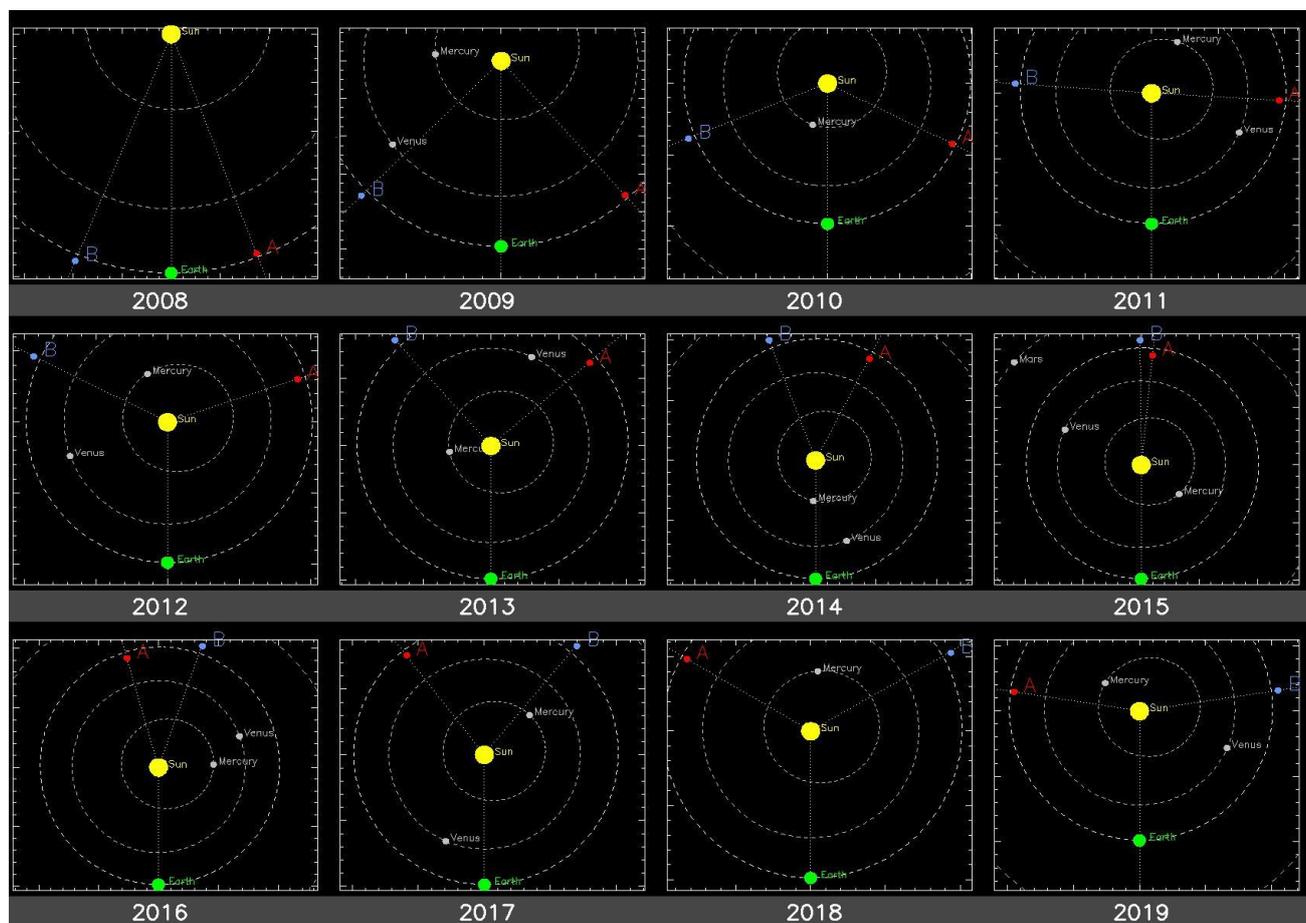
3.7 - STEREO, Hinode, SDO, RHESSI, des télescopes de recherche spatiale

La mission STEREO de la NASA a démarré en 2006. Elle répond à une question fondamentale : lorsqu'une éjection de matière solaire se produit, cette éjection est-elle susceptible d'atteindre la Terre ? Depuis l'environnement terrestre, toute éjection est vue en projection sur le ciel en deux dimensions ; STEREO apporte d'autres points de vue autour du Soleil, permettant une visualisation des phénomènes en trois dimensions. Cela permet d'identifier leur direction de propagation, d'où le nom de la mission. On a ainsi pu voir en même temps la face du Soleil tournée vers la Terre et la face opposée !

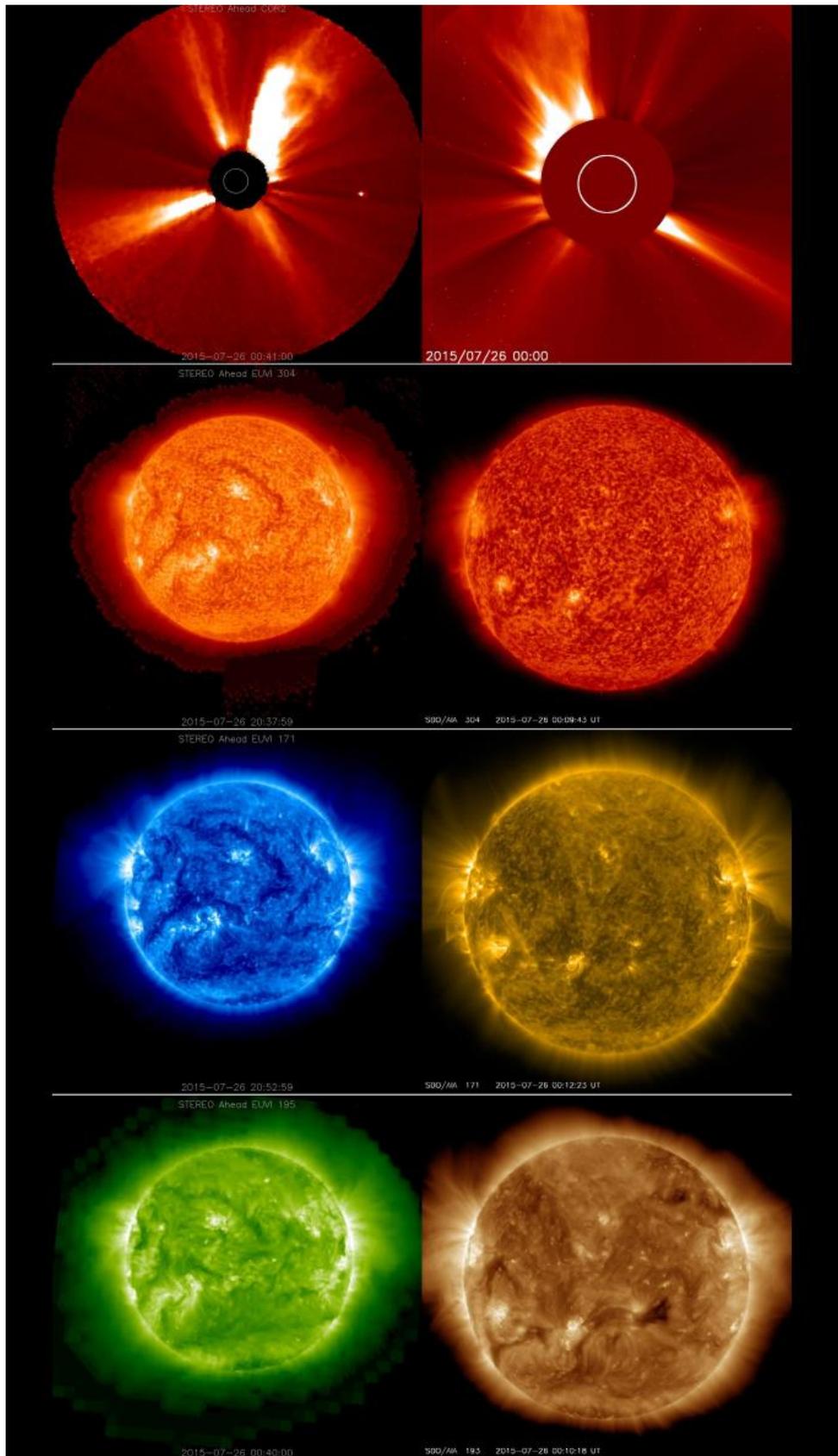
Les images temps réel de STEREO sont ici : <https://stereo.gsfc.nasa.gov/>

STEREO se compose de deux sondes identiques en orbite autour du Soleil. STEREO A, étant un peu plus près du Soleil, a une période de révolution plus rapide que la Terre ; inversement, STEREO B est un peu plus éloignée et donc plus lente. Accolées au lancement, elles se sont retrouvées en opposition par rapport au Soleil en 2011, voyant ainsi 100% de la surface. En 2015 elles étaient de nouveau réunies, mais en opposition par rapport à la Terre, 100% du Soleil étant encore visible en couplant STEREO à un autre instrument en orbite terrestre comme Solar Dynamics

Observatory (SDO). Aujourd'hui, seule STEREO A fonctionne, et l'on obtient des observations stéréoscopiques en couplant STEREO A à SDO et SOHO. STEREO porte des imageurs UV de la couronne solaire ainsi que des coronographes permettant de détecter les éjections se répandant dans le milieu interplanétaire.

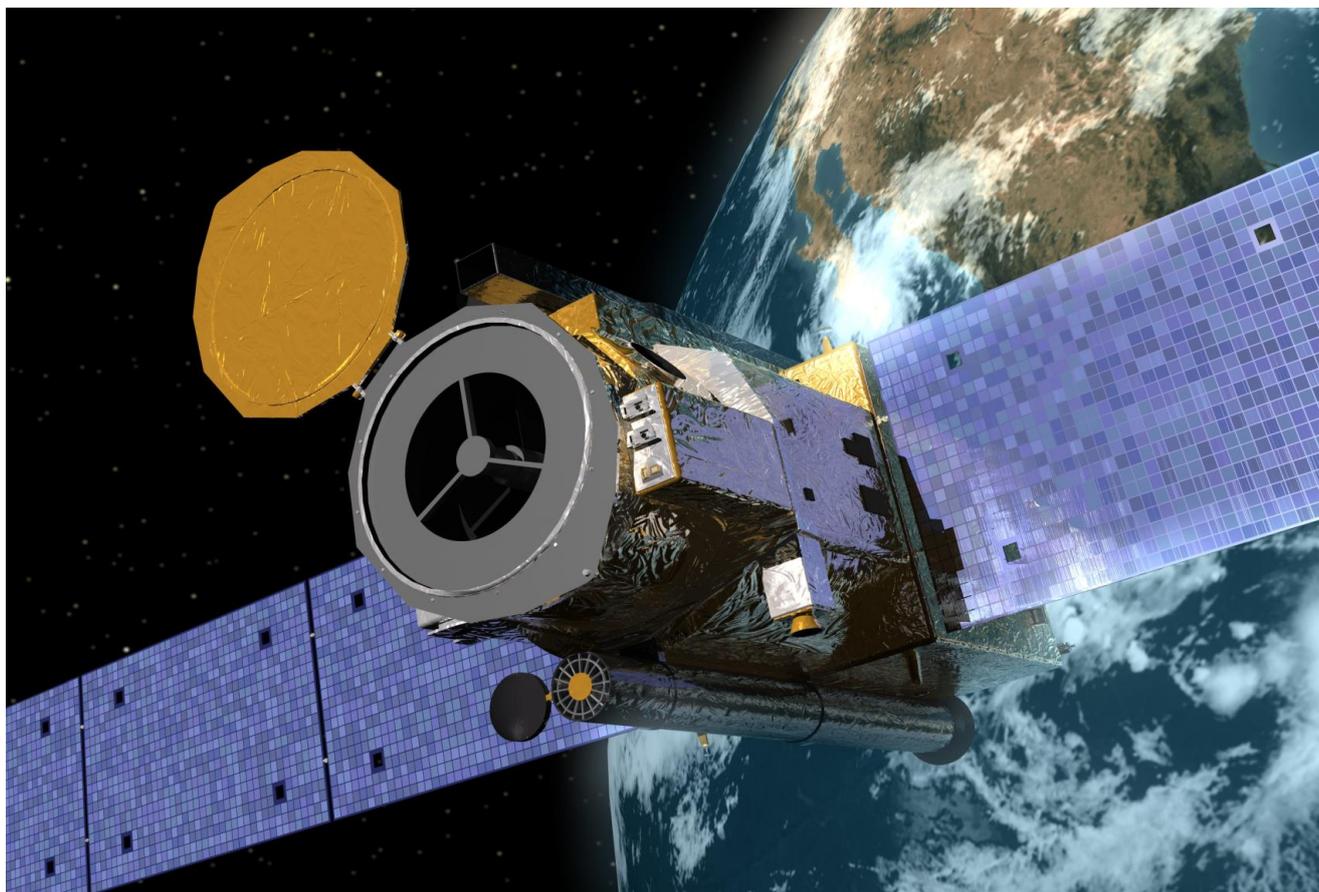


Trajectoire de STEREO A et B (en rouge et en bleu) entre 2008 et 2019. La Terre est en vert et le Soleil en jaune. A ce jour, STEREO A et la Terre donnent une vision stéréoscopique du Soleil (STEREO B est en panne depuis 2014). ©STEREO/NASA.



100% de la surface solaire visible au même instant ! Une vision stéréoscopique du Soleil le 26 Juillet 2015 alors que STEREO A se trouvait en opposition par rapport à la Terre, à 300 millions de km, de l'autre côté du Soleil. A gauche, la face opposée du Soleil ; à droite celle visible depuis la Terre. En haut, la couronne vue par STEREO (à gauche) et SOHO (à droite). Plus bas, les images en UV obtenues par STEREO (à gauche) et par AIA sur SDO (à droite) correspondant aux trois températures de 0.1, 1 et 2 millions de degrés. Fausses couleurs. ©NASA/ESA.

Hinode (« lever de Soleil » ou SOLAR B) est le successeur de Yohkoh (« rayon de Soleil » ou SOLAR A), placé sur orbite en 2006 par le Japon. Hinode est le fruit d'une collaboration entre la JAXA (agence spatiale japonaise) et la NASA avec une participation européenne. Ce satellite porte le plus puissant télescope jamais construit pour l'observation solaire depuis l'espace, le SOT (Solar Optical Telescope). Il a un diamètre de 50 cm et distingue dans le bleu des détails de 0.2 secondes de degré soit 150 km sur la surface solaire. Ce pouvoir séparateur a permis à Hinode de mieux comprendre le magnétisme solaire en révélant des détails jamais vus grâce à son imageur monochromatique et son spectrographe couplé à un dispositif d'analyse de la polarisation de la lumière. Hinode aura un successeur encore plus puissant, SOLAR C, vers 2025.



Le satellite Hinode et son télescope, le SOT ©JAXA/NASA/ESA.

Solar Dynamics Observatory (SDO) est un satellite d'observation solaire placé en 2010 par la NASA en orbite géostationnaire à 36000 km au dessus de nos têtes. Cette position était nécessaire en raison du débit de données extraordinaire de l'instrument, qui descend au sol une dizaine d'images 4000 x 4000 par minute et ceci 24 heures sur 24 ! Cela correspond à environ 500 giga octets de données par jour, soit environ 150 téra octets par an à stocker, archiver, conserver en ligne et sécuriser, donc à dupliquer en de nombreux exemplaires. SDO a pour objectif scientifique de suivre les phénomènes dynamiques solaires, comme les éruptions et éjections. Mais il a aussi pour but de comprendre la structure interne du Soleil. SDO a beaucoup bénéficié de l'expérience acquise sur SOHO ; il porte un imageur UV avec plusieurs canaux étagés entre 10 000 et 10 millions de degrés pour explorer l'atmosphère (Atmospheric Imaging Assembly, AIA, successeur de Extreme UV Imaging Telescope, EIT sur SOHO). SDO embarque aussi un instrument héliosismologique pour étudier les mouvements et champs magnétiques de la surface solaire, travaillant dans une raie du Fer à 617.3 nm de longueur d'onde (Helioseismic Magnetic Imager, HMI, successeur de Michelson Doppler Imager, MDI sur SOHO).



Installation de SDO dans la tête de la fusée Atlas (©SDO/NASA).

Les images en temps réel de SDO sont ici: <https://sdo.gsfc.nasa.gov/>

Enfin, RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager), est un instrument de la NASA en orbite depuis 2002 et dédié à l'étude des éruptions solaires et des mécanismes d'accélération de particules chargées (électrons, protons, ions) jusqu'à une vitesse proche de celle de la lumière. RHESSI observe les rayonnements de ces particules de haute énergie en rayons X et γ avec une instrumentation spécialisée.

Les rayons X

Les rayons X ont des longueurs d'onde dans la gamme 0.01 à 1 nm, et les rayons γ , plus énergétiques, ont une longueur d'onde inférieure à 0.01 nm.

Un électron accéléré à 50% de la vitesse de la lumière possède une énergie correspondant aux rayons X ; un proton, 1840 fois plus massif, sera dans le domaine des rayons γ .

4 – Vers les grands instruments du futur...

La prochaine décennie sera riche en nouveaux instruments, tant au sol que dans l'espace. Au sol, on souhaite observer des détails de la surface solaire de plus en plus fins avec des télescopes géants. La nouvelle génération aura 4 mètres de diamètre et sera pourvue d'une « optique adaptative », capable de corriger les effets de la turbulence atmosphérique sur un champ d'observation étendu, sans quoi ces télescopes seraient inexploitable. Dans l'espace, on va tenter de s'approcher du Soleil pour l'examiner de plus près et faire des mesures in situ des quantités physiques

fondamentales que sont les champs électriques et magnétiques, les densités particulières, les vitesses, les températures locales... Ce sont des paramètres indispensables pour contraindre les modèles théoriques et les simulations numériques sur supercalculateurs qui tentent d'expliquer les phénomènes observés. Ainsi Solar Orbiter et Solar Probe vont s'approcher du Soleil à 55 rayons solaires pour l'un (approximativement la distance de Mercure au Soleil), et seulement 10 rayons solaires pour l'autre.

4.1 - DKIST et les champs magnétiques coronaux

DKIST, pour Daniel K. Inouye Solar Telescope (ancien sénateur d'Hawaï) est un projet américain financé par la NSF (National Science Foundation) et piloté par le NSO (National Solar Observatory) autour d'un consortium d'une vingtaine d'institutions. En construction à Haleakala, Hawaï, à 3000 m d'altitude, il bénéficiera d'un ciel très pur et sera achevé en 2020. Il sera muni d'instruments imageurs et de spectro polarimètres pour mesurer les champs magnétiques à haute résolution spatiale dans le proche Infra Rouge de 1 à 5 microns de longueur d'onde. La mesure des champs magnétiques de la couronne est un défi auquel DKIST va s'attaquer. L'IR facilite les mesures et justifie le grand diamètre du télescope ; en effet un miroir de 4 m a le même pouvoir séparateur dans l'IR que les télescopes de 1 m actuellement disponibles dans le visible.

Pour en savoir plus : <http://dkist.nso.edu/>

4.2 - EST, SOLAR C, le Soleil à la loupe !



Vue d'artiste du futur télescope EST aux Canaries (©consortium européen EST).

EST (European Solar Telescope) est le projet européen complémentaire de DKIST qui devrait être opérationnel en 2026. Il s'agit aussi d'un télescope de 4 m, mais axé sur l'observation à haute résolution spatiale de la surface solaire dans le domaine visible et la mesure des champs magnétiques de surface avec une très grande précision. EST est piloté par l'Institut d'Astrophysique des Canaries (IAC), basé à La Laguna (Tenerife) qui dispose de deux observatoires d'altitude sur les îles de

Tenerife et de La Palma. EST s'appuie sur un consortium de 15 pays participants dont la France (CNRS). Il devrait dévoiler, de temps en temps, des détails sur la surface solaire 4 fois plus fins (40 km) que ceux fournis par les meilleurs instruments actuels (150 km). EST n'atteindra cet objectif ambitieux que si l'on parvient à concevoir une optique correctrice de la turbulence atmosphérique suffisamment efficace : c'est la principale difficulté technologique.

Pour en savoir plus : <http://www.est-east.eu/>

SOLAR C devrait observer le Soleil en orbite basse à partir de 2026. Successeur de SOLAR B, son objectif est de percer les secrets des structures fines et des champs magnétiques de surface, comme EST au sol. Ce sera le plus gros télescope spatial jamais réalisé pour l'étude du Soleil avec son miroir de 1.50 mètre de diamètre, qui devrait lui permettre de distinguer des détails de 50 km, comme EST, mais en permanence car situé hors atmosphère. Bien que Solar C sera en orbite basse, son diamètre lui permettra de voir des détails plus fins que ses collègues Solar Orbiter et Solar Probe, pourtant plus près du Soleil, car leur mission prioritaire est différente. SOLAR C, piloté par le Japon, sera le fruit d'une importante coopération internationale.

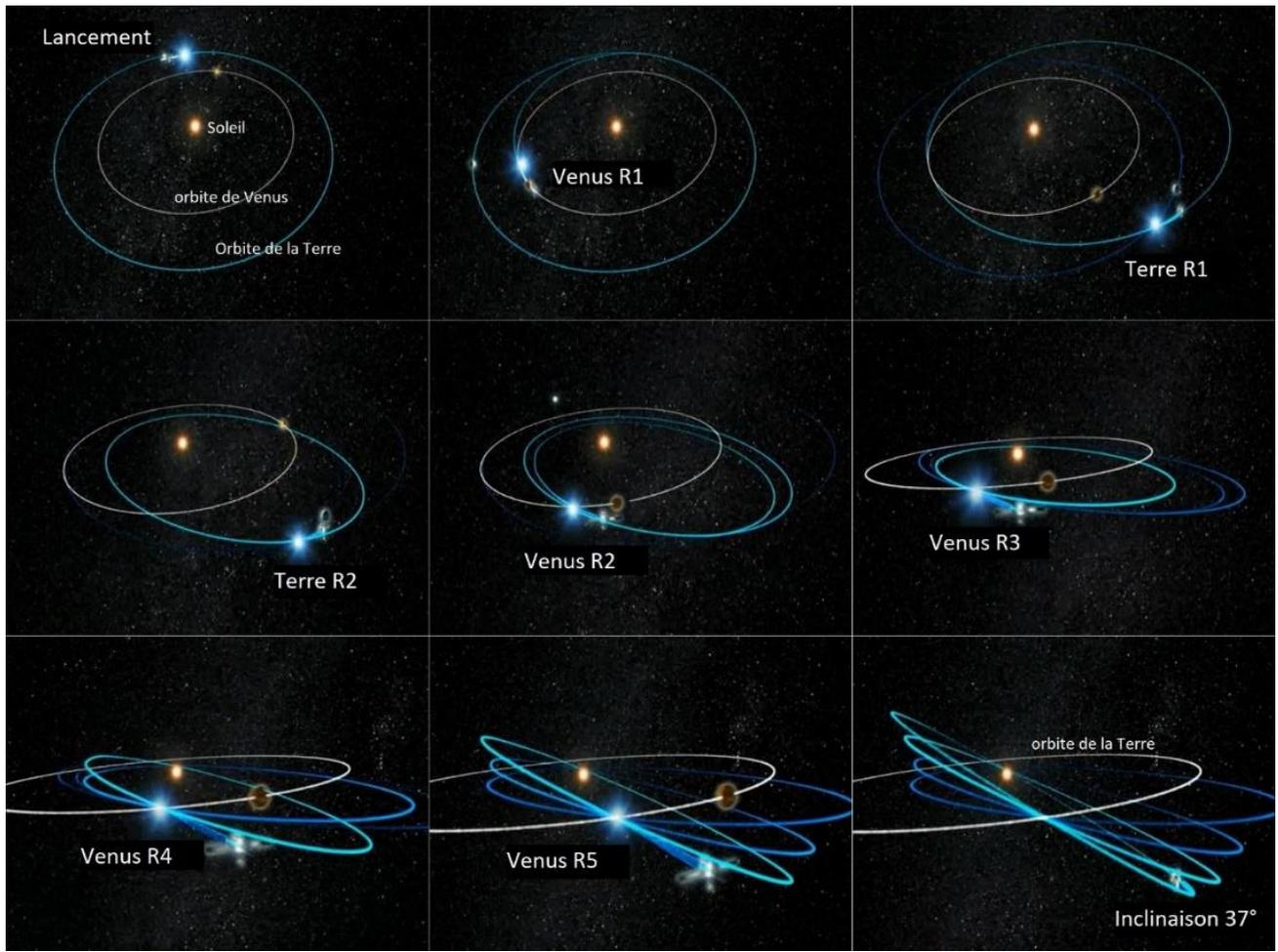
4.3 - Solar Orbiter et Solar Probe, plus près du Soleil

Solar Orbiter (SolO) est un projet de l'ESA en cours de préparation pour lancement en 2019. Cependant, la sonde ne sera opérationnelle qu'en 2022, car elle va mettre trois années à se positionner sur son orbite d'observation autour du Soleil. SolO doit profiter à plusieurs reprises de l'assistance gravitationnelle de la Terre et de Vénus pour infléchir sa trajectoire et atteindre l'orbite désirée. C'est une ellipse dont le périhélie (point le plus près du Soleil) se trouve au niveau de l'orbite de Mercure, à 0.25 UA, à une distance du Soleil jamais atteinte (sinon par Solar Probe). En même temps, le plan de l'orbite de SolO va s'incliner progressivement par rapport au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre) de manière à atteindre 37° et survoler les pôles du Soleil, qui sont peu visibles depuis la Terre. Seule la sonde Ulysses est sortie de ce plan, mais elle était très loin, à 2 UA du Soleil, et ne portait pas d'imageur.

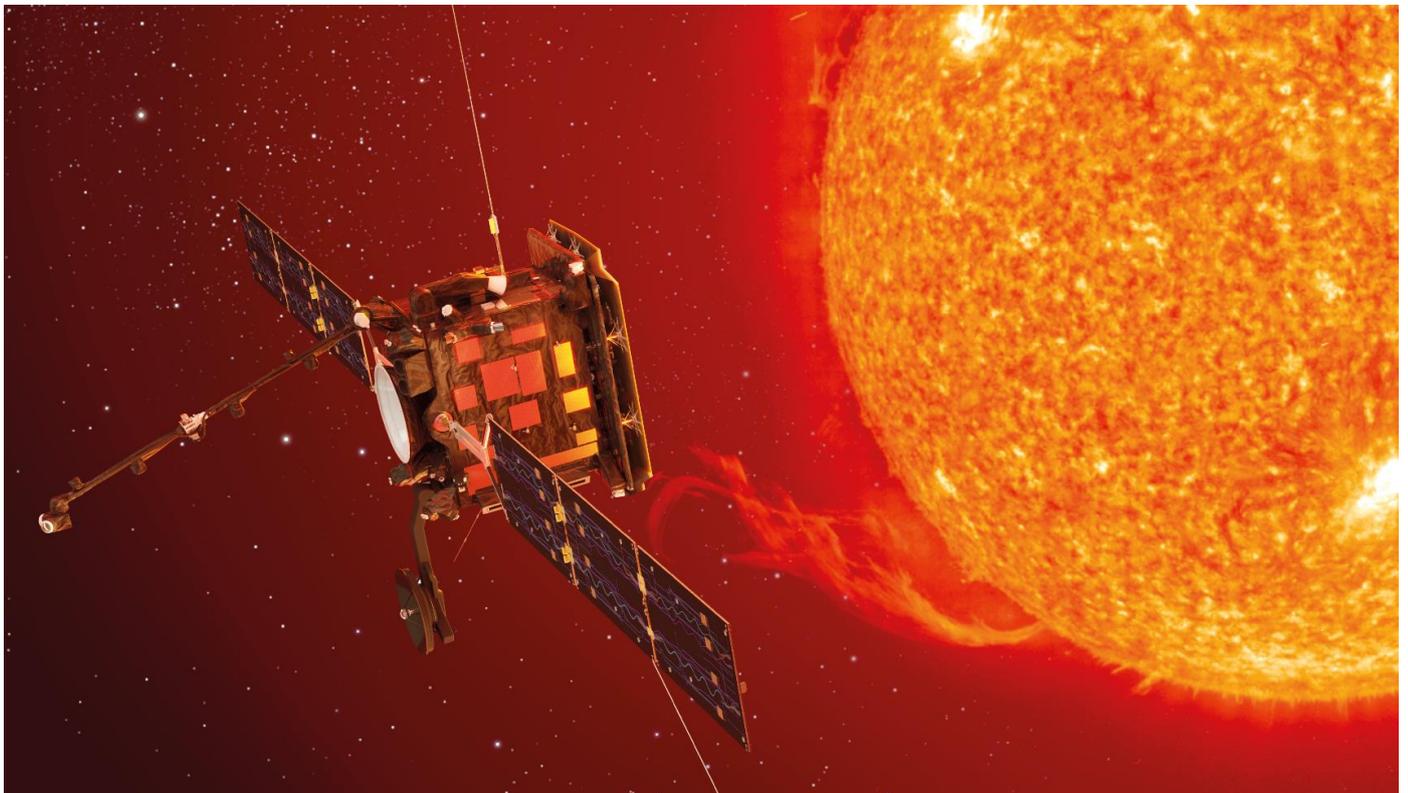
SolO embarquera plusieurs télescopes UV et X, cartographiera les champs magnétiques de la surface solaire et mesurera in situ de nombreux paramètres physiques environnementaux (densités des particules, vitesse, champ électrique et magnétique local). SolO devrait distinguer des détails de 150 km sur la surface solaire. Comme il sera soumis à un rayonnement 20 fois plus intense qu'en orbite terrestre, il sera protégé par des boucliers thermiques. C'est le grand projet spatial européen de la prochaine décennie très attendu par les spécialistes. Il sera complété sur d'autres aspects par le projet américain Solar Probe.

L'unité astronomique (UA)

1 unité astronomique = 1 UA = distance moyenne Soleil Terre = 149 597 871 km

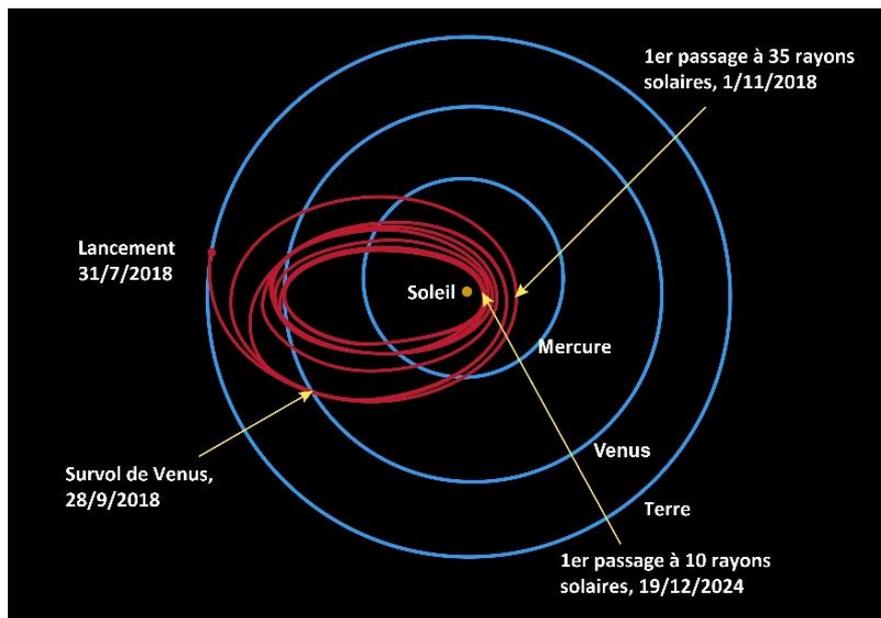


Solar Orbiter sort progressivement du plan de l'écliptique pour voir les pôles et se rapproche du Soleil grâce à des rebonds gravitationnels. R signifie rencontre avec la planète citée. (©ESA)

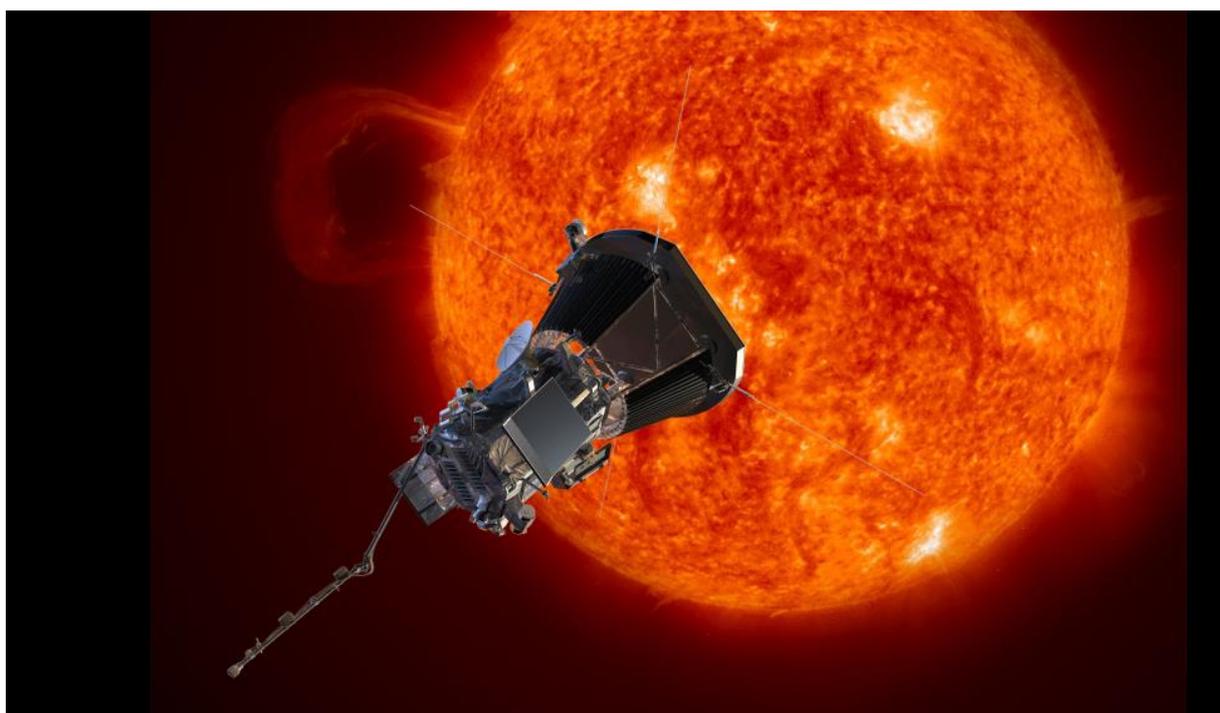


Vue d'artiste de Solar Orbiter (©ESA)

Parker Solar Probe rend hommage au physicien Eugène Parker, de l'Université de Chicago, qui a proposé le premier un modèle du vent solaire. C'est un flot de particules (électrons, protons, ions) issu de la couronne solaire, et qui balaie le milieu interplanétaire à une vitesse supersonique. Solar Probe sera lancé à l'été 2018 et sa mission est de se rapprocher le plus possible du Soleil, à seulement 10 rayons solaires en 2024, c'est-à-dire nettement plus près que Solar Orbiter (55 rayons solaires). Ainsi Solar Probe plongera franchement dans l'atmosphère du Soleil et étudiera, par des mesures in situ, la naissance du vent solaire et les mécanismes d'accélération des particules chargées. Solar Probe est un grand défi technologique car à 10 rayons solaires, l'intensité du rayonnement est multipliée par 500 par rapport à ce qu'un satellite reçoit en orbite terrestre. Son bouclier thermique fait 11.5 cm d'épaisseur et doit résister à une température de 1400 degrés, pour mettre à l'abri les instruments de mesure.



Parker Solar Probe (©NASA) reste dans le plan de l'écliptique mais se rapproche très près du Soleil, à 10 rayons, et pénètre dans la couronne solaire.



Vue d'artiste de Parker Solar Probe (©NASA) protégé par son épais bouclier thermique.