De la lunette de Galilée au satellite Picard: 400 ans d'observation du soleil

Jean-Marie Malherbe

▶ **To cite this version:**

Jean-Marie Malherbe. De la lunette de Galilée au satellite Picard: 400 ans d'observation du soleil. École thématique. De la lunette de Galilée au satellite Picard: 400 ans d'observation du soleil, Versailles, 2010, pp.35. cel-00682272

HAL Id: cel-00682272
https://cel.hal.science/cel-00682272

Submitted on 24 Mar 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

De la lunette de Galilée au microsatellite PICARD : quatre cents ans d'observation du Soleil

Jean-Marie Malherbe, Astronome à l'Observatoire de Paris

Le XVII^{ème} siècle est d'importance pour la physique solaire : c'est au début de ce siècle que les observations régulières du Soleil ont commencé avec l'invention de la lunette astronomique, il y a 400 ans. On a découvert les taches (ou confirmé leur existence, car certains groupes, visibles à l'œil nu, semblent avoir été vus bien plus tôt), décrit leur forme, leur mouvement apparent, leur répartition sur le disque, la rotation solaire ; à partir de 1650 une anomalie est survenue (quasi absence de taches durant plusieurs décennies) en même temps qu'un refroidissement climatique, dont l'explication n'est toujours pas connue avec certitude de nos jours. La complexité des mécanismes de la variabilité solaire, dont les premières énigmes ont été posées par les observations du XVII^{ème} siècle, justifie qu'en 2010, le CNES place en orbite terrestre un nouvel instrument spatial. C'est la mission PICARD, baptisée en l'honneur de l'abbé Jean Picard, qui consacra une partie de sa vie à l'observation du soleil au sein du nouvel Observatoire Royal. C'est ainsi qu'il revient au Roi Soleil d'avoir structuré et organisé le développement des sciences en France, sous l'impulsion de Colbert, par la création de l'Académie Royale en 1666, et de l'astronomie en particulier, par la fondation de l'Observatoire de Paris en 1667 (figure 1).

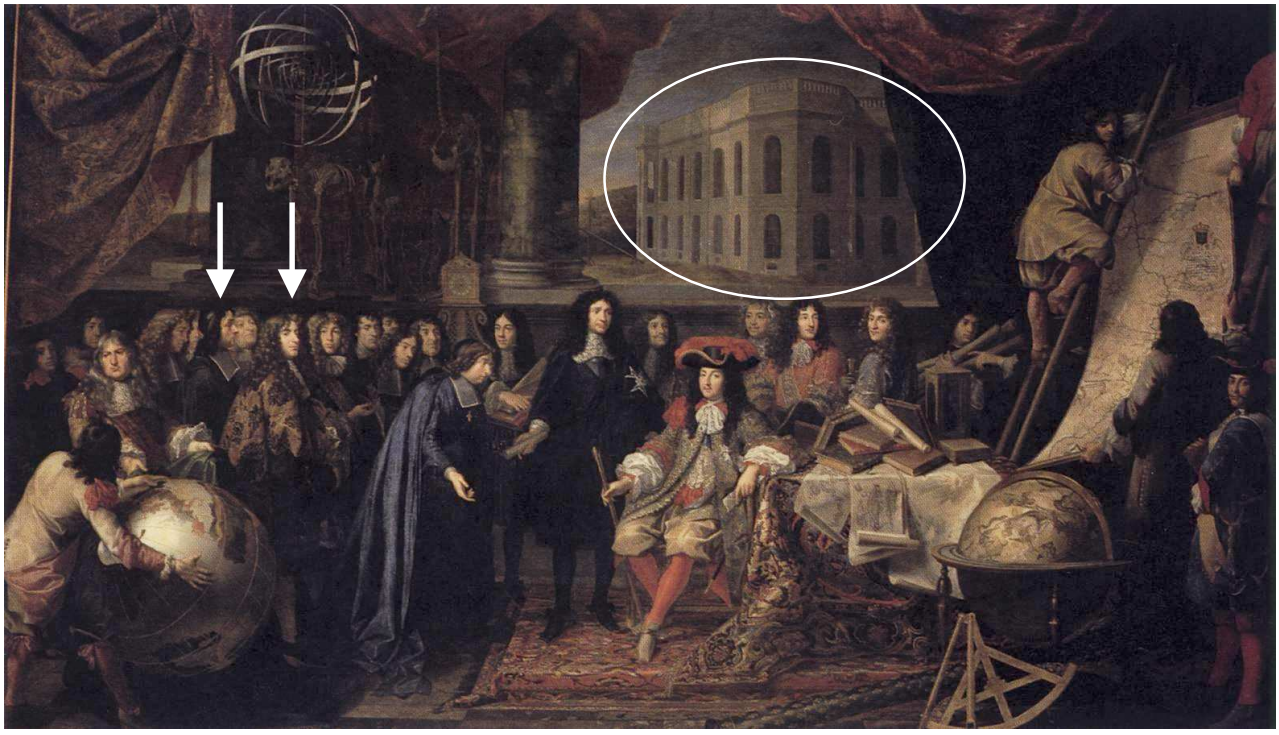


Figure 1 : Colbert présente l'Académie au Roi. Jean-Dominique Cassini (nommé à la tête de l'Observatoire) et Jean Picard (astronome) sont à gauche. Dans le fond, l'Observatoire Royal. Peinture d'Henri Testelin (1616-1695). Huile sur toile. Château de Versailles. Wikimedia Commons.

Figure 2 : Grande Lunette double de l'Observatoire de Meudon (18 mètres de longueur), ultime aboutissement de trois siècles de perfectionnements des lunettes de Galilée et de Képler, et dont la technologie est abandonnée (chez les professionnels) depuis cent ans au profit des télescopes beaucoup plus puissants et compacts (document Obs. Paris).

I – Le Soleil au XVIIème siècle

Au tout début du XVII^{ème} siècle, quatre astronomes eurent l'idée d'observer le Soleil à l'aide de la lunette astronomique (figure 2), introduite par Galilée (1564-1642) en 1609, puis perfectionnée par Képler, et s'intéressèrent aux taches solaires, sujet de choix à la portée des nouvelles lunettes. Il s'agit de Johannes Fabricius (1587-1616) en Hollande, Thomas Harriot (1560-1621) en Angleterre, Galilée lui même en Italie, et le Jésuite Christoph Scheiner (1575-1650) en Allemagne. Harriot aurait effectué la première observation à la lunette des taches solaires, en Décembre 1610. Fabricius fut sans doute le premier à comprendre que le mouvement des taches solaires d'un jour à l'autre (décalage moyen de 13° vers l'Ouest en coordonnées héliographiques latitude - longitude) était dû à la rotation du Soleil sur lui même. Néanmoins, ce sont Galilée et Scheiner (ouvrage Rosa Ursina, 1630) qui furent les plus assidus dans les observations des taches (figure 3). Galilée démontra que les taches sont bien des structures solaires, et ne peuvent être attribuées au transit de planètes intérieures (comme Mercure et Vénus) passant entre le Soleil et la Terre. A cette époque, on observait les taches par projection sur un écran en

papier sur lequel on dessinait (instruments appelés machines héliotropiques par Hevelius), ainsi que le montre la figure 4 tirée de Machinae Coelestis (1673).

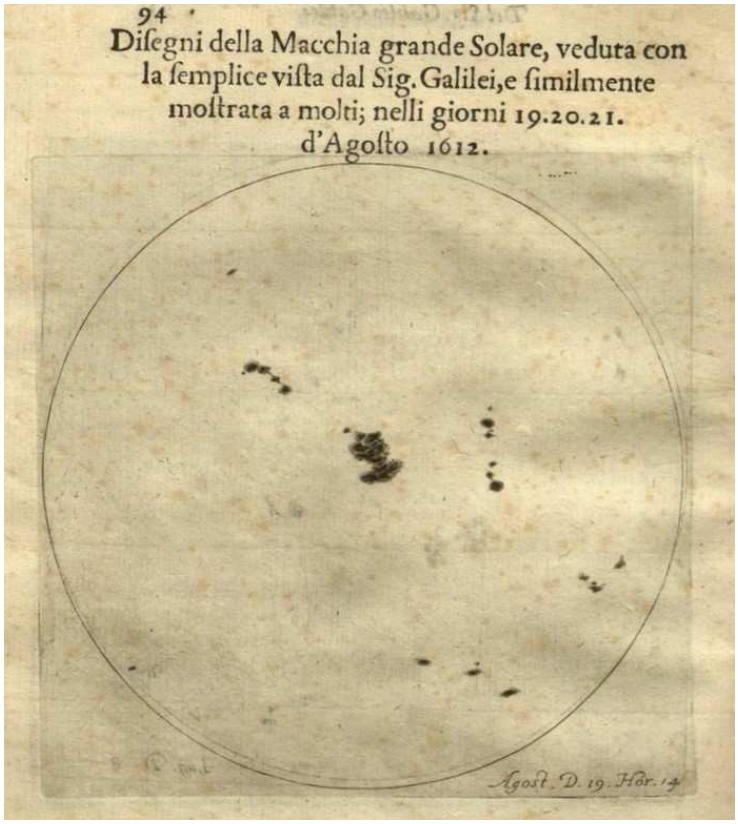


Figure 3 : dessin des taches par Galilée daté de 1612 (Numérisation fonds POSNER, Carnegie Mellon)

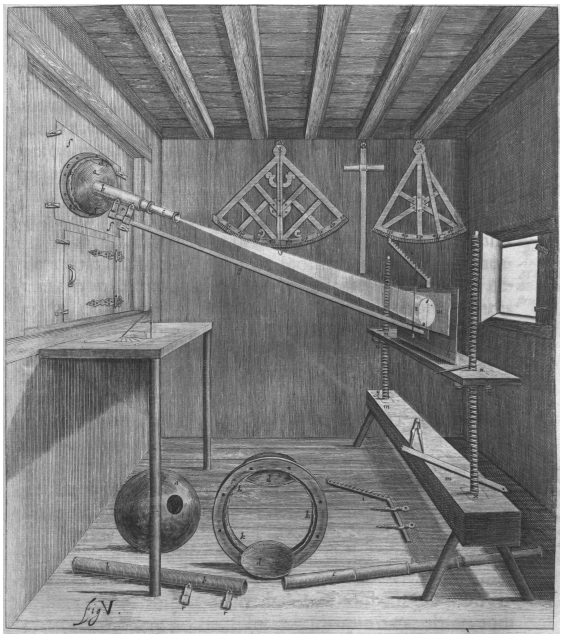


Figure 4 : Télescope héliotropique d'Hevelius présenté dans Machinae Coelestis (Numérisation POSNER, Carnegie Mellon), il s'agit d'une lunette dont l'oculaire était tiré pour fonctionner en objectif de projection. On dessinait les taches.

Christoph Scheiner serait le premier à avoir décrit dans Rosa Ursina (1630) les variations des trajectoires des taches en fonction de la saison d'observation, qui résulte d'effets géométriques 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°). On voit en particulier sur certains de ses dessins (figure 5) que la trajectoire des taches n'est pas rectiligne mais incurvée, traçant ainsi à la surface du Soleil les parallèles. Christoph Scheiner serait le premier astronome à avoir utilisé une monture équatoriale, permettant de suivre le mouvement des astres en n'agissant que sur un mouvement de rotation de l'appareil dans le sens contraire de celui de la Terre, comme le montre la figure 6 de Rosa Ursina (1630). La lunette tourne autour d'un axe incliné qui est parallèle à l'axe du Monde. Ce type de monture, utilisé jusqu'en seconde moitié du XX^{ème} siècle, est supplanté aujourd'hui dans les télescopes contemporains par les montures azimuthales, plus complexes mais plus compactes, grâce aux progrès technologiques.

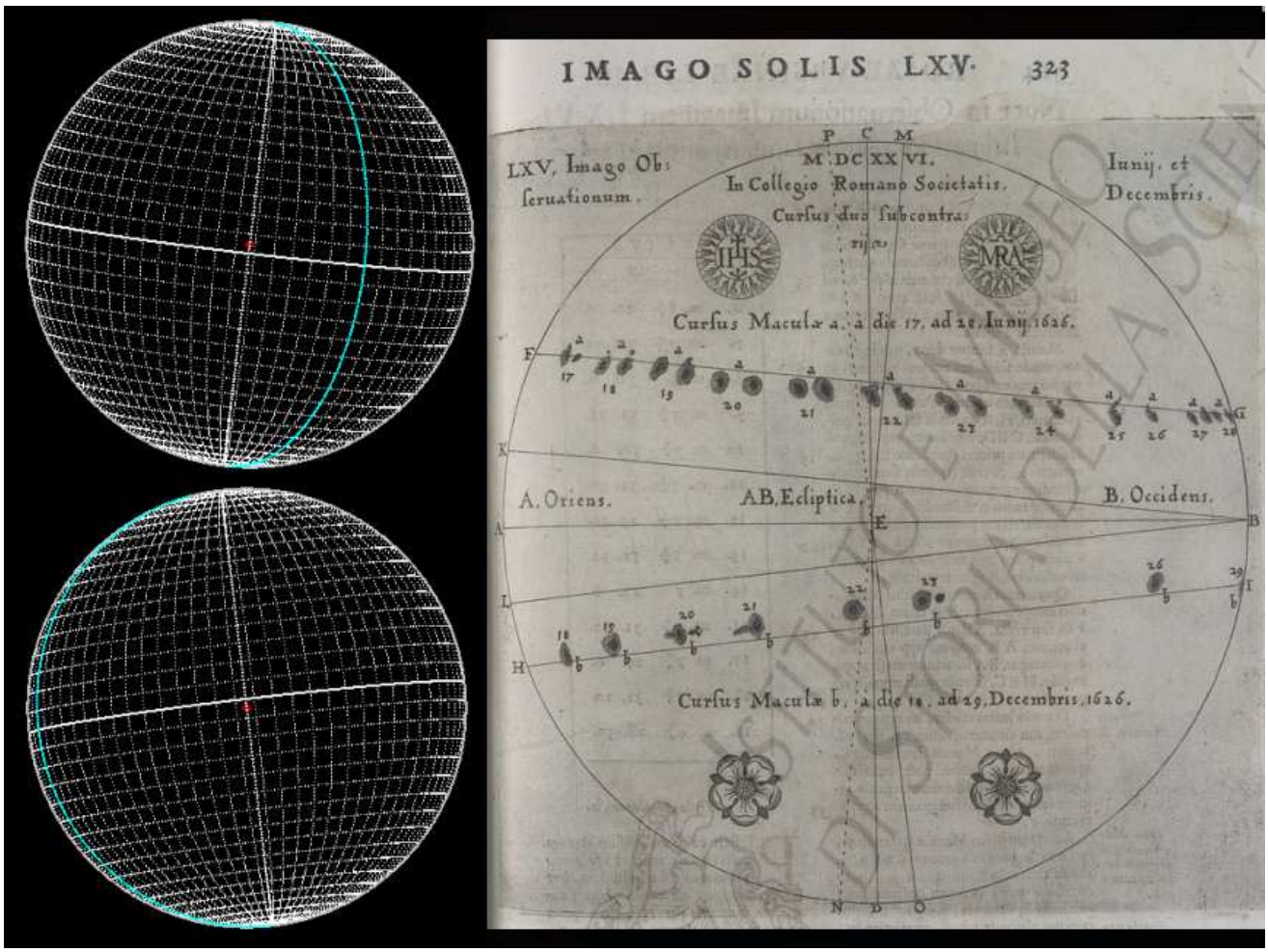


Figure 5 : Observations de Juin 1626 et de Décembre 1626 (Rosa Ursina, Numérisation Institut et Musée d'Histoire des Sciences de Florence) avec à gauche (documents Obs. Paris) un calcul de la position des méridiens et parallèles (le long desquels se déplacent les taches) réalisé dans les conditions exactes de l'observation de Scheiner.

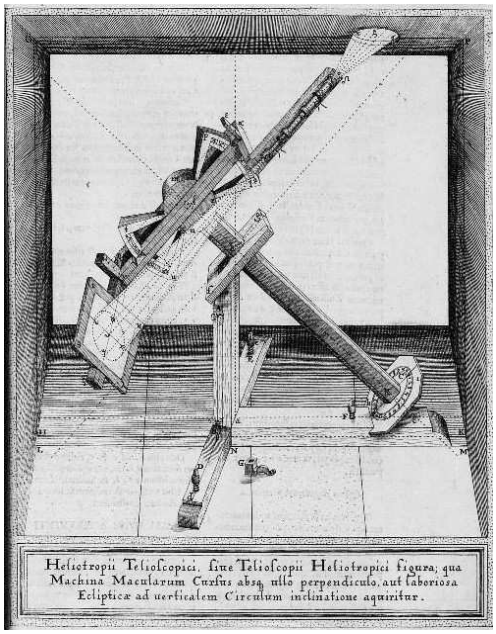


Figure 6 : Télescope héliotropique de Scheiner, l'ancêtre des montures équatoriales (Rosa Ursina, 1630, Numérisation Gallica/BNF) ; il s'agit également d'une lunette par projection qui permettait de dessiner les taches.

En France, c'est la fondation de l'Observatoire de Paris (1667) qui va contribuer à l'essor de l'observation astronomique en rassemblant les talents de l'époque. Jean-Dominique Cassini (1625-1712) fut invité, sur recommandation de Jean Picard, membre de l'Académie naissante, par Colbert à la tête de l'Observatoire. Les lunettes à focale moyenne étaient suspendues à des mâts, ainsi que le montre la gravure de la figure 7. Des lunettes aériennes à longue focale, sans tuyau, s'y sont adjointes vers 1685 (figure 8) ; elles étaient construites selon les principes énoncés par Christian Huygens (1629-1695). Les objectifs étaient fixés soit sur le bâtiment construit par Claude Perrault, soit sur la Tour de Marly, en bois, provenant du système hydraulique (machine de Marly) d'alimentation des eaux de Versailles. On imagine la difficulté d'observer à l'aide de tels appareils ! L'usage des quarts de cercle (figure 9) a également été introduit. Des lunettes sans tuyau ont été utilisées par Hevelius à Gdansk (figure 10).

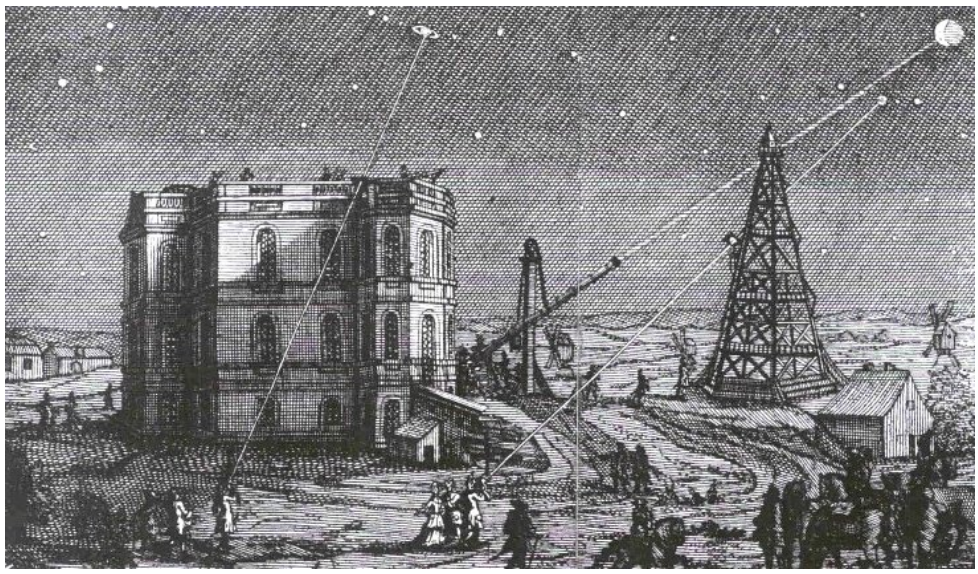


Figure 7 : L'Observatoire de Paris, les lunettes aériennes sans tuyau, et la Tour de Marly (document Obs. Paris)

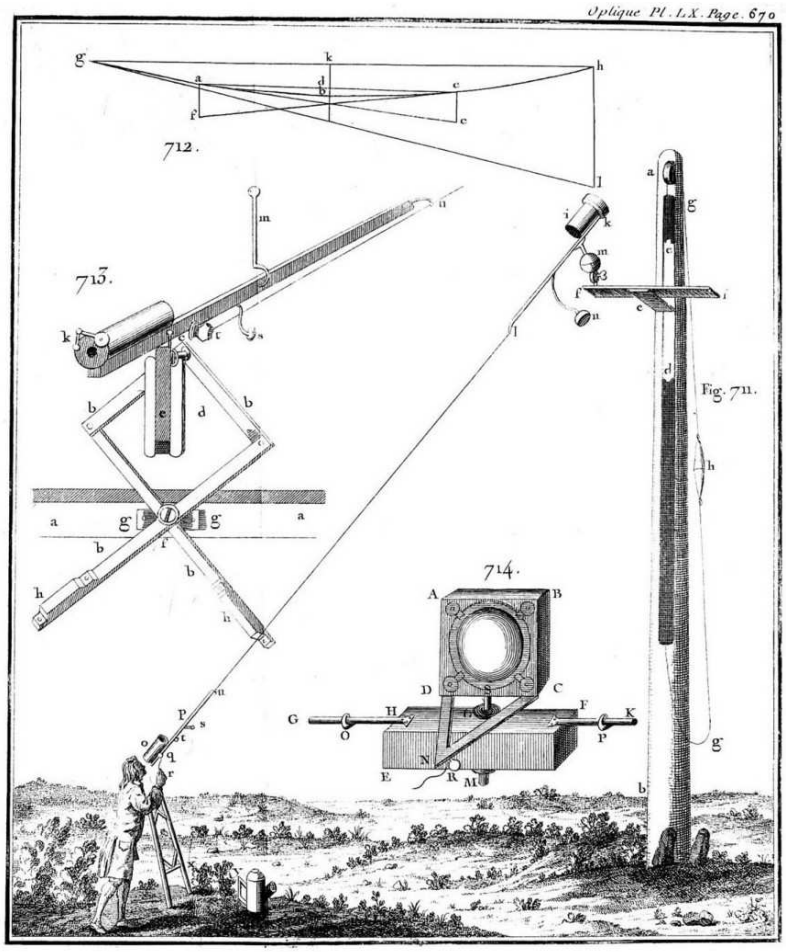


Figure 8: Christian Huygens, savant hollandais, l'un des premiers membres de l'Académie des sciences, énonce les principes de la lunette aérienne sans tuyau à longue focale (document bibliothèque numérique interuniversitaire de Jussieu)

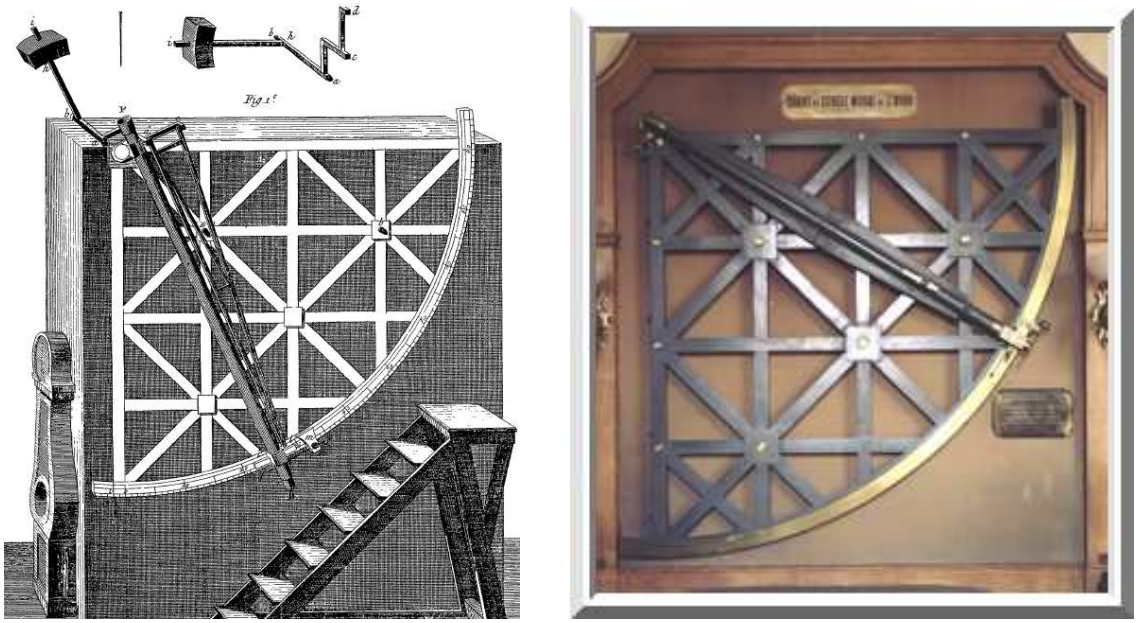


Figure 9: quart de cercle mural (numérisation bibliothèque interuniversitaire de Jussieu, à gauche) et quart de cercle BIRD conservé à l'Observatoire de Paris (document Obs. Paris)

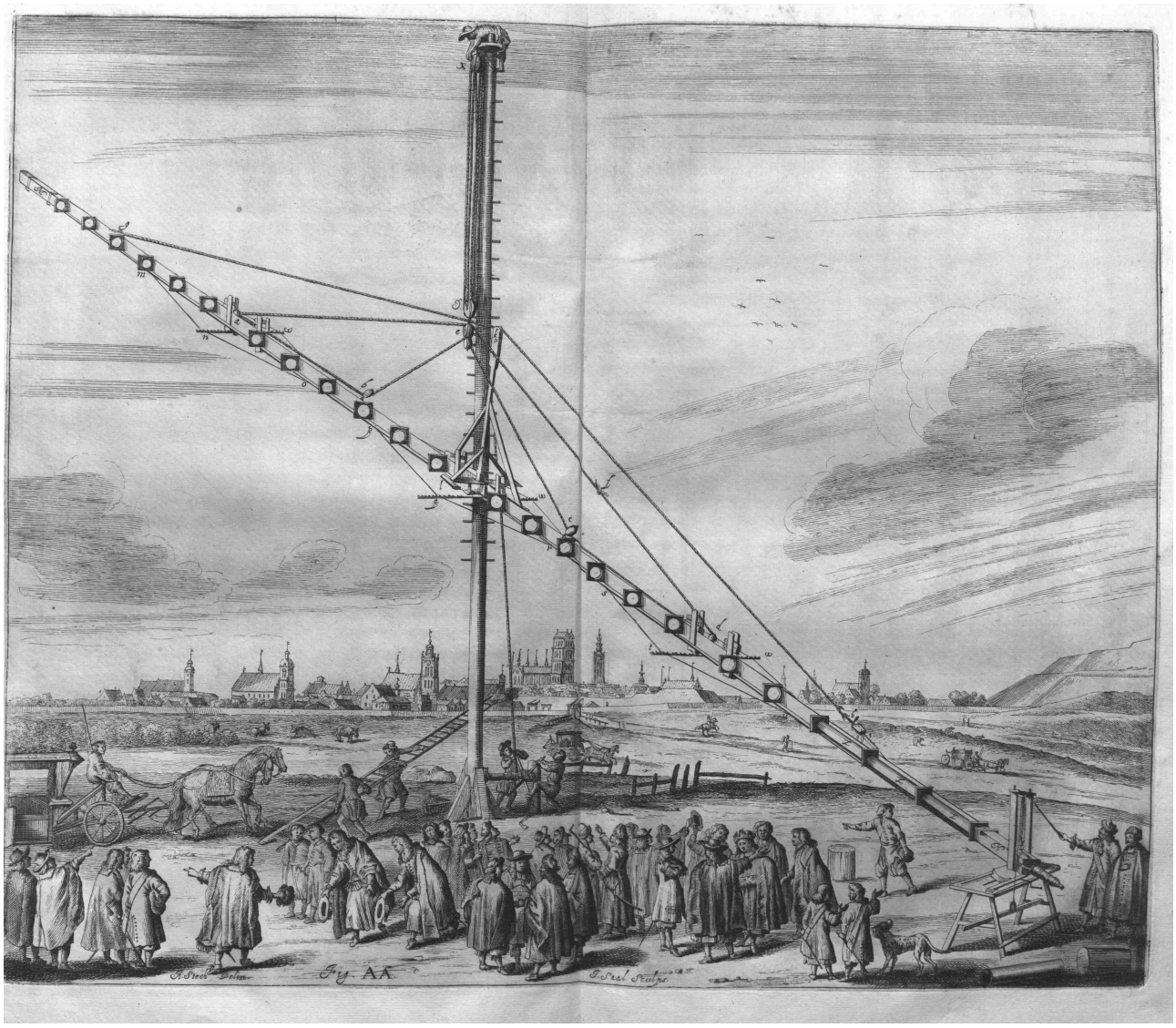


Figure 10 : Grande Lunette de 45 mètres d'Hevelius (Machinae Coelestis, numérisation POSNER, Carnegie Melon)

Dès 1666, le rayonnement continu du spectre solaire (les couleurs de l'arc en ciel) est identifié par Isaac Newton (1643-1727) à l'aide d'un prisme décomposant la lumière. Les raies, signatures des atomes présents dans l'atmosphère solaire, seront découvertes bien plus tard.

La fondation de l'Observatoire de Paris 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 des horloges qui tiennent la seconde en vingt quatre heures. On peut ainsi qualifier le XVII^{ème} siècle de siècle de l'Astrométrie.

En 1672, Jean-Dominique Cassini (1625-1712) et Jean Richer (1630-1696) réalisent une prouesse : ils parviennent à déterminer à 10% près la distance du Soleil à la Terre en profitant d'une opposition de Mars (alignement Soleil Terre Mars). Les deux observateurs mesurent simultanément la position de Mars depuis Paris et Cayenne. La parallaxe obtenue permet le calcul de la distance Terre Mars (d). A partir de cette valeur, ils utilisèrent la troisième loi formulée en 1618 par l'astronome

allemand Johannes Kepler (1571-1630) appliquée à la révolution de la Terre et de Mars autour du Soleil (T période de révolution, a demi grand axe): $T_{Mars}^2/a_{Mars}^3 = T_{Terre}^2/a_{Terre}^3$ = constante, et $a_{Mars} = a_{Terre} + d$ lors de l'opposition. Ils trouvèrent a_{Terre} voisin de 130 millions de km contre 149,6 millions pour la valeur moyenne actuelle. Le diamètre du Soleil en km s'en déduit à partir de son diamètre angulaire sur le ciel, abondamment mesuré notamment par Picard et La Hire (voir plus loin).

La même année, on doit à Newton l'invention du télescope à miroirs dont l'aboutissement le plus poussé (figure 11) est constitué des quatre grands télescopes européens du Very Large Telescope (VLT) de 8 mètres de diamètre, installés au Chili dans la Cordillière des Andes sur un site privilégié (2600 m d'altitude), ou encore des deux télescopes Keck américains de 10 mètres de diamètre trônant à 4200 mètres d'altitude sur le Mauna Kea à Hawaï. La technologie n'a pas fini de nous surprendre puisque la future génération de télescopes (2020) dépassera quarante mètres de diamètre, à la recherche du moindre photon (grain de lumière) en provenance des premiers âges de l'Univers : de véritables machines à remonter le temps qui permettront de connaître un Univers âgé de plus de 13 milliards d'années en observant toujours plus loin, sachant que la lumière voyage à 300 000 kilomètres par seconde !

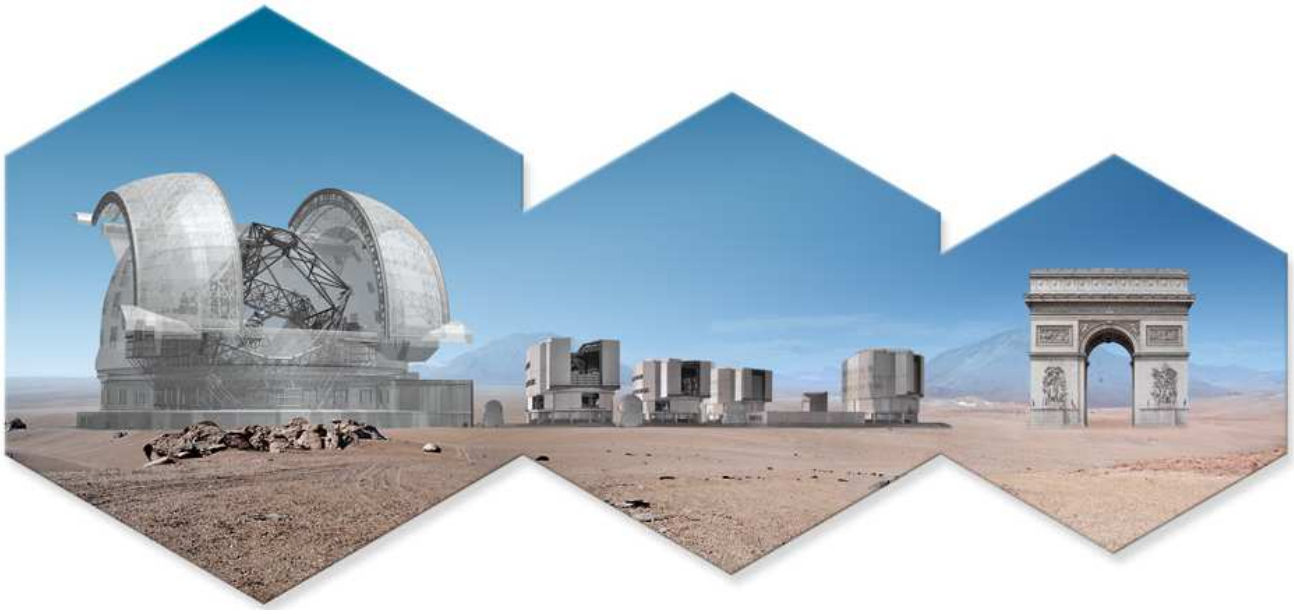


Figure 11 : Le futur Extremely Large Telescope européen (ELT, à gauche, et ses quarante mètres de diamètre) ; les quatre télescopes de 8 mètres du Very Large Telescope européen (VLT, au milieu). Document ESO (European Southern Observatory)

Isaac Newton, en 1687, parviendra également à donner une formulation mathématique aux lois de Kepler aboutissant à l'évaluation de la masse du Soleil. Newton a énoncé la loi de la gravitation universelle, dans laquelle la force d'attraction F entre deux corps de masses m et M est donnée par $F = G\,m\,M / r^2$. Le calcul est présenté dans son ouvrage Principia Mathematica. Newton

partit du principe que le mouvement d'un corps gravitant résulte d'un équilibre entre la force centrifuge et la force de gravitation, le conduisant à une explication physique des lois empiriques de Kepler. La troisième loi de Kepler s'écrit désormais : $T^2 / a^3 = 4 \pi^2 / GM$, où M est la masse du Soleil et G la constante d'attraction universelle. Cette constante G ne sera mesurée expérimentalement qu'en 1798 par Henry Cavendish (1731-1810), avec une très bonne précision.

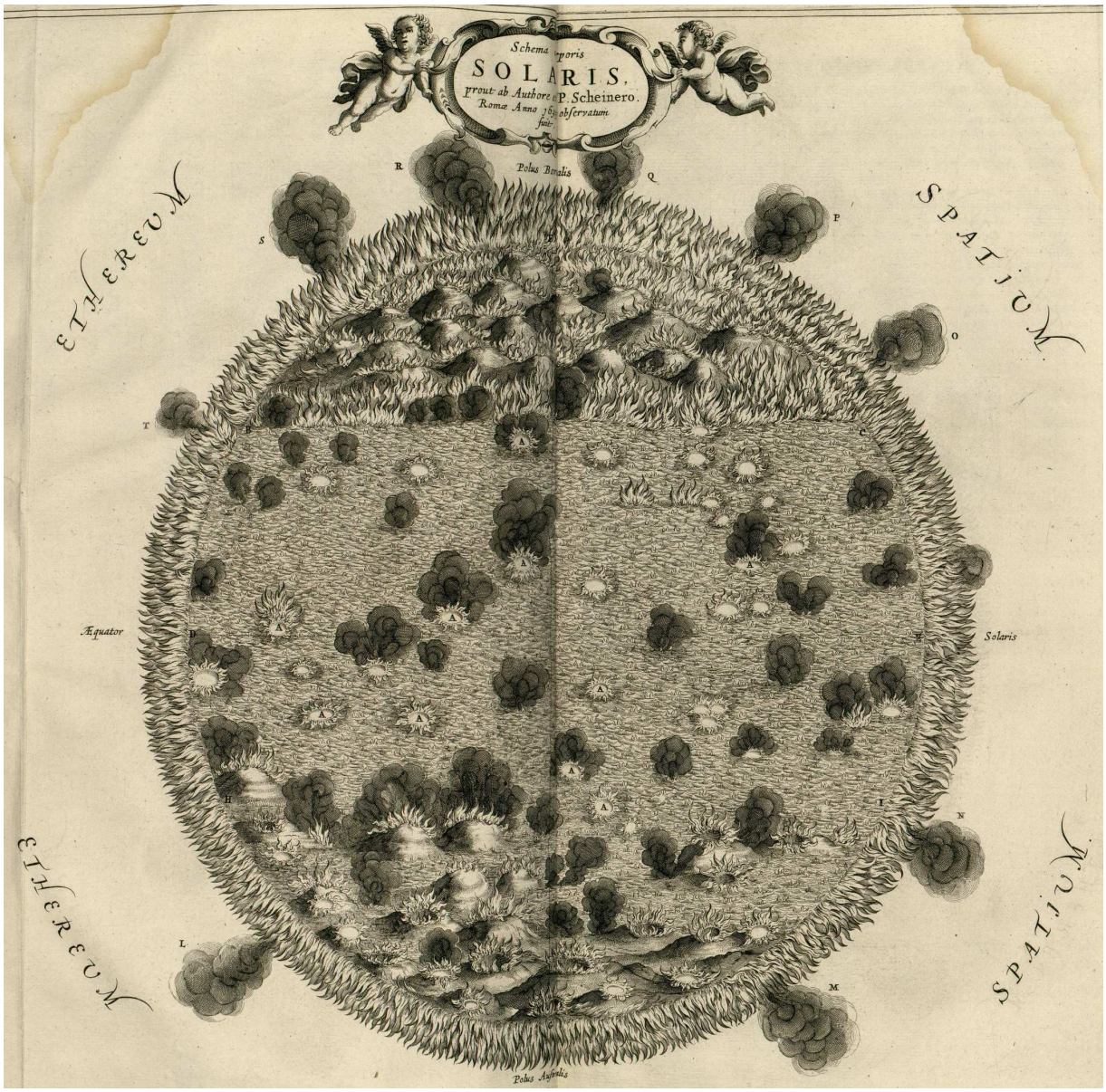


*Figure 12 : Une vision du Soleil selon Kircher à la fin du XVII*ème *siècle (Document numérisé Gallica, BNF), certes fantaisiste, mais où l'on retrouve étonnamment certaines structures qui ne seront identifiées que bien plus tard, comme les spicules visibles au limbe au dessus de la chromosphère et les protubérances (Mundus Subterraneus, 1664). Les « exhalaisons et l'origine des taches », les « sources de la lumière », la « région du Soleil brûlante » sont autant de questions qui ont fort progressé depuis, mais qui interpellent toujours les chercheurs contemporains tant la « machinerie solaire » est complexe (sa structure interne est de surcroît inaccessible à l'observation).*

En cette fin du XVII^{ème} siècle, une grande moisson d'observations de taches a été obtenue, mais il faudra attendre le XIX^{ème} siècle et l'accumulation d'un important volume de données pour que la physique solaire se mettre véritablement en place. Quelques astronomes éclairés, compulsant des archives et les données anciennes, vont alors aller de découverte en découverte.

II – Les découvertes du XIX^{ème} siècle

En 1800, William Herschell (1737-1822), sur les traces de Newton, découvre le rayonnement infra rouge 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 visible décomposée par un prisme : c'est le rayonnement infra rouge (invisible), dont on sait aujourd'hui qu'il représente la moitié de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace.

C'est l'allemand Joseph Fraunhofer (1787-1826) qui identifie en 1817 dans le spectre solaire visible les raies spectrales d'absorption larges (figure 13) qu'il attribue à des 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 d'absorption qui sont autant de signatures des éléments chimiques présents dans l'enveloppe gazeuse qui entoure la surface solaire, et qu'on appelle photosphère (couche visible épaisse de 300 km à 5750 degrés) ou chromosphère (épaisse de 2000 km à 8000 degrés). Les raies coronales (enveloppe gazeuse diffuse à 1 million de degrés qui raccorde le Soleil au milieu interplanétaire) ont été mises en évidence plus tard lors des éclipses totales.

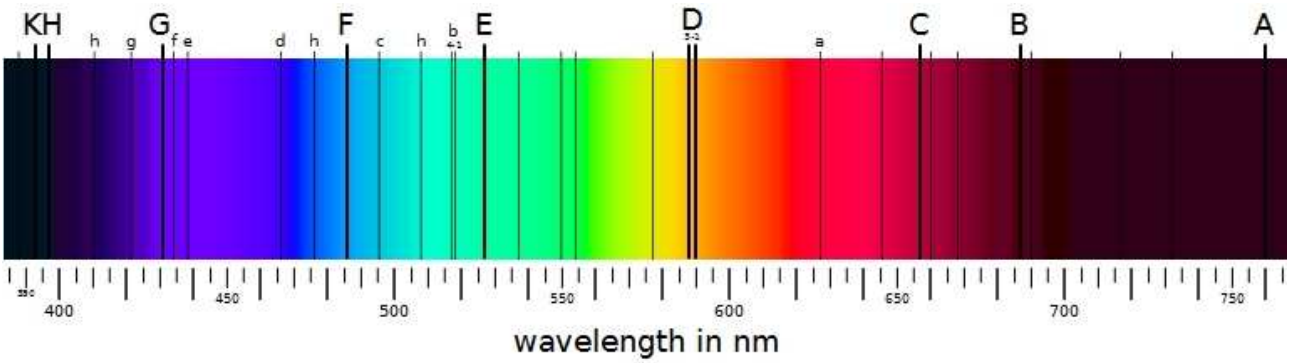


Figure 13 : Spectre de Fraunhofer, montrant les raies les plus larges du spectre solaire (Document Wikimedia Commons) ; C=Hydrogène, D=Sodium, E=Fer, b=Magnésium, F=Hydrogène, G=molécule CH, HK=Calcium

Claude Pouillet (1790-1868) effectue en 1838 la première tentative de détermination 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, ce qui conduira à la première estimation de la température de surface du Soleil,

et par là de sa luminosité connaissant son rayon. On sait aujourd'hui que cette « constante » est voisine de 1365 Watts par mètre carré, en moyenne, mais qu'elle est sujette à de faibles fluctuations en liaison avec l'activité solaire. L'impact de ces petites variations (moins de 0.1%) sur le climat terrestre est un sujet de recherche délicat en pleine actualité et qui nécessite le déploiement de moyens spatiaux pour s'affranchir des effets de l'atmosphère terrestre qui absorbe une partie du rayonnement solaire. On exposera plus loin les grandes interrogations laissées sur ce sujet par les observations du XVII^{ème} siècle.

Le cycle d'activité solaire de 11 ans (figure 14), caractérisé par une variation cyclique du nombre de taches présentes sur la surface du Soleil, ne sera découvert qu'en 1843, par l'astronome allemand Heinrich Schwabe (1789-1875), compilant les données anciennes. L'identification du cycle magnétique associé de 22 ans est plus récente : elle est dûe à l'astronome américain George Hale (1868-1938). Wolfgang Gleissberg (1903-1986) découvrira ultérieurement une modulation du cycle de 11 ans (c'est à dire une variation d'amplitude des cycles de 11 ans, certains cycles étant très productifs en taches, et d'autres moins) : la période de cette modulation avoisine 80-90 ans, et reste controversée.

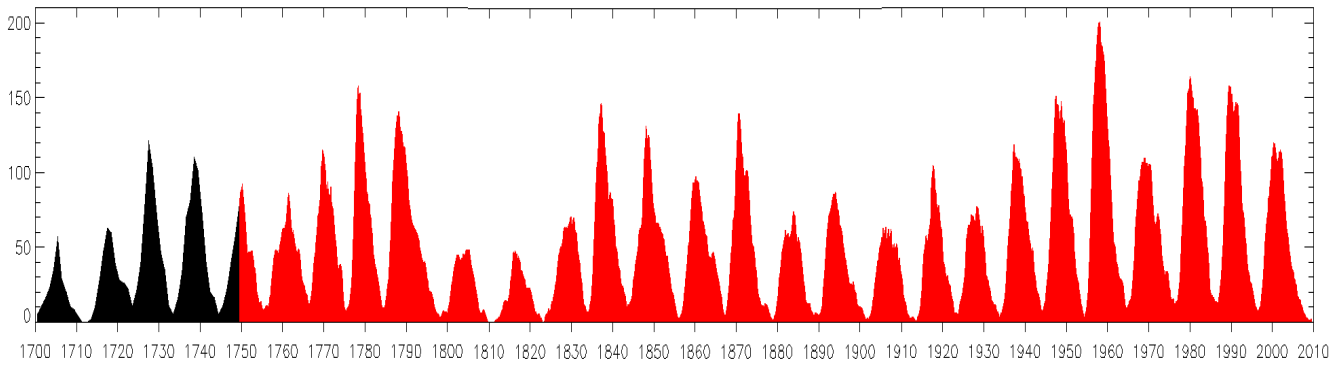


Figure 14 : Nombre de taches (dit de Wolf) en fonction du temps (document Observatoire Royal de Bruxelles) mettant en évidence le cycle de 11 ans ainsi qu'une modulation plus ou moins séculaire

En 1852, Edward Sabine (1788-1883) qui s'intéresse à l'activité géomagnétique terrestre, c'est à dire aux fluctuations et perturbations du champ magnétique terrestre, 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 ? Edouard Sabine a mis le doigt sur une discipline qui trouve en ce début de XXI^{ème} siècle un regain d'intérêt considérable, que l'on appelle « météorologie spatiale » ou encore science des interactions Soleil Terre, dont les enjeux dépassent largement ceux de la connaissance fondamentale pour entrer dans le champ des applications économiques et sociétales (perturbations des lignes à haute tension, des télécommunications, dégradation des satellites en orbite terrestre, santé des personnels naviguants soumis aux rayonnements ionisants solaires, etc…).

Hippolyte Fizeau (1819-1896) et Léon Foucault (1819-1868) sont à l'origine en 1845 d'une véritable révolution qui va changer durablement l'Astronomie pendant plus de cent ans jusqu'à l'apparition des détecteurs électroniques modernes (matrices photo sensibles CCD, CMOS, etc…). Il

s'agit du premier daguerréotype du Soleil. Dès lors, la perception de l'objet astronomique, en passant du dessin à la photographie, va s'affranchir de la subjectivité de l'observateur et permettre la conservation d'une information objective, exempte d'interprétation, à l'usage des générations futures. C'est un immense pas qui était franchi venant compléter les progrès de la spectroscopie qui vont révéler les messages transmis par la lumière. L'alliance de ces deux techniques sera le moteur de la physique astronomique, ou astrophysique naissante en ce milieu du XIX^{ème} siècle.

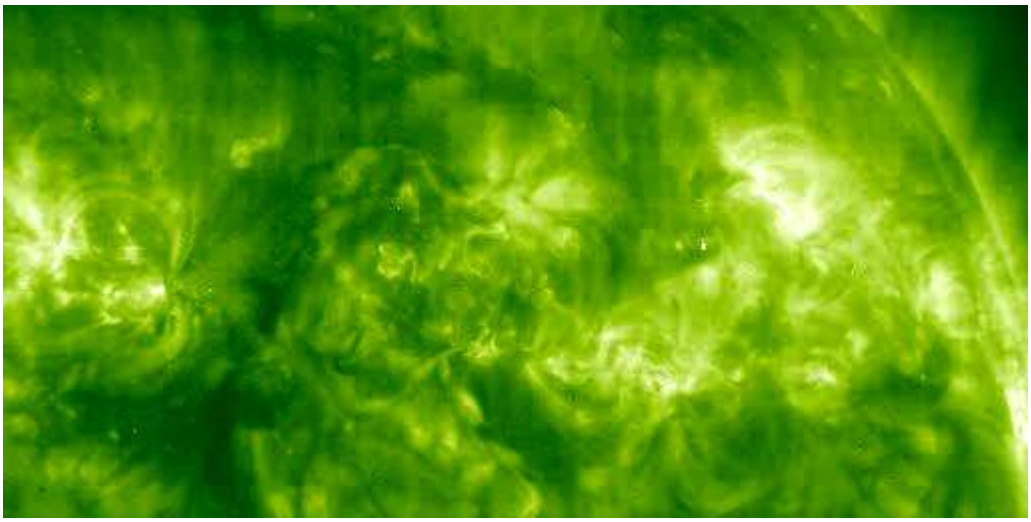


Figure 15 : Eruptions observées en Ultra Violet par l'instrument EIT de SOHO (ESA/NASA)

Quelques années après le premier daguerréotype, c'est Richard Carrington (1826-1875) qui se distingue en observant la première éruption en lumière blanche dans un centre actif composé de taches et de nombreuses facules (l'éruption est matérialisée par les filets blancs indiqués par des flèches rouges sur la figure 16). Les éruptions solaires (dont un exemple d'observation récente est présenté figure 15) sont des éjections de plasma (gaz ionisés) liées à des instabilités d'origine magnétique résultant de l'évolution des champs magnétiques des centres actifs (taches), notamment sous l'influence de la rotation différentielle. Ces phénomènes sont d'une grande importance en particulier dans les relations entre le Soleil et la Terre, car une éruption peut injecter dans le milieu interplanétaire une grande quantité de plasma renforçant le vent solaire (flux permanent d'électrons et ions), qui, lorsqu'il arrive à la Terre, interagit avec la magnétosphère et l'ionosphère. Les mécanismes précis qui régissent le déclenchement des éruptions et des éjections de masse coronale, leur développement et leur propagation, sont complexes et nécessitent le déploiement d'outils de simulations numériques sur de puissants ordinateurs. Ils constituent des sujets de recherche moderne en plein essor sur lesquels progressent de nombreuses équipes internationales, appuyées par les données issues de plusieurs missions spatiales en cours comme SOHO (ESA/NASA), TRACE et STEREO (NASA).

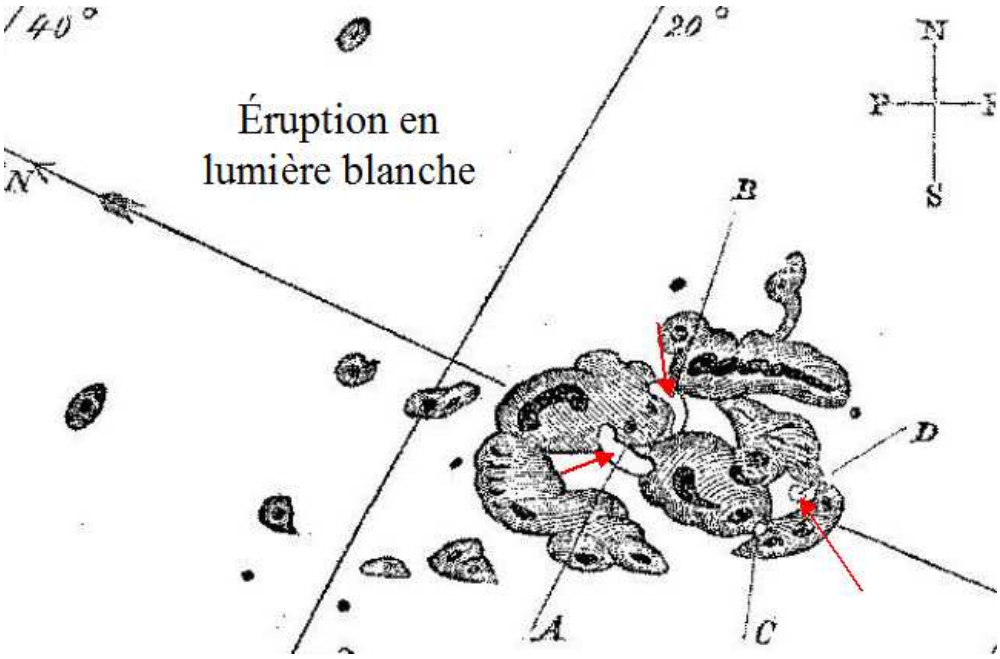


Figure 16 : Eruption décrite par Carrington dans le bulletin de la Royal Society de Londres

Carrington, grâce à ses milliers d'observations de taches solaires, a également mis en évidence le phénomène si important de rotation différentielle du Soleil, à savoir que le Soleil ne tourne pas sur lui même comme un corps solide, mais présente une rotation sur lui même plus rapide à l'équateur (26 jours) que vers les pôles (31 jours). On pense aujourd'hui que cette rotation différentielle serait à l'origine de la variabilité et de la cyclicité solaire (cycles de 11 ans). Carrington serait également à l'origine de la loi de Spörer : au début d'un nouveau cycle les taches apparaissent à des latitudes élevées (30 à 45°) alors qu'elle ne sont plus qu'à 10° de latitude en fin de cycle. C'est ce qu'on appelle le diagramme papillon présenté par la figure 17.

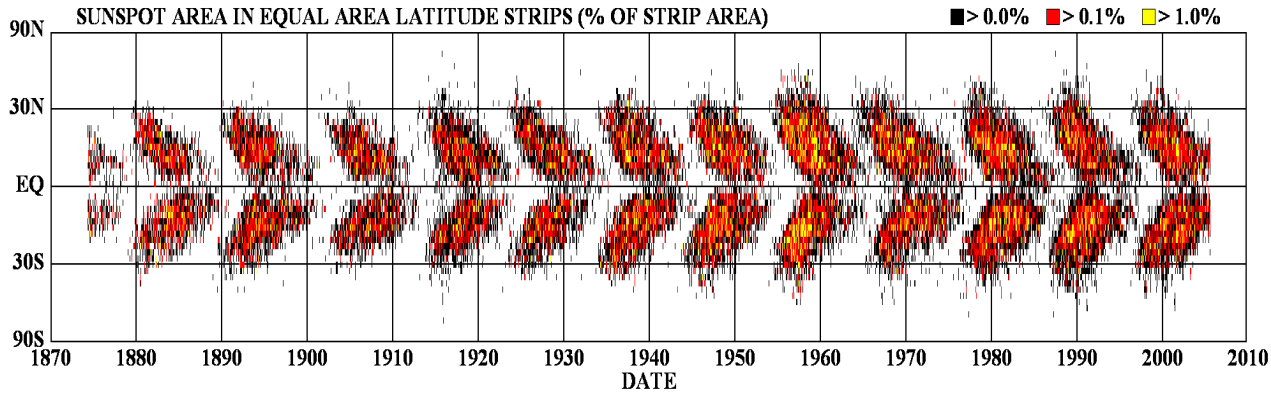


Figure 17 : Répartition des taches en latitude ou diagramme papillon (document NASA)

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 au delà du limbe solaire (constituées d'Hydrogène, elles apparaissent naturellement en rouge/rose – la lumière émise par la raie H alpha à 656.3 nm - lors des éclipses, alors qu'elles sont noyées dans la lumière de l'astre le reste du temps). Après l'éclipse, Janssen et Lockyer pointent leur spectroscope (figure 18) dans leur direction et montrent ainsi qu'il est possible, en tous temps, de les observer en isolant leur émission par un moyen spectroscopique. Cette grande découverte est à l'origine d'une collection centenaire de clichés solaires à l'Observatoire de Meudon, que Janssen fondera en 1876, et qui sera rattaché à l'Observatoire de Paris en 1926.

Figure 18 : Janssen et Lockyer démontrent la possibilité d'observer les protubérances hors éclipses grâce à la spectroscopie (clichés Obs. Paris, sauf l'image centrale qui a été obtenue par une équipe de l'Institut d'Astrophysique du CNRS en 1999). Les protubérances sont depuis observées quotidiennement à Meudon grâce à ces techniques.

Jules Janssen avait l'esprit inventif, et mit au point ce que l'on peut considérer comme l'ancêtre du cinématographe des frères Lumière : il s'agit du révolver photographique (figure 19), conçu pour figer le mouvement lors de l'observation des points de contact entre la planète Vénus et les bords solaires pendant le passage de la planète devant le disque solaire en 1874.

Lors de la même éclipse du 18 Août 1868, une autre découverte majeure est attribuée, grâce à la spectroscopie, aux mêmes observateurs. Orientant le spectroscope dans la direction de la couronne solaire, qui apparaît lors des éclipses comme une vaste auréole de lumière, composée d'électrons, d'ions et de poussières, une raie jaune, inconnue jusqu'alors, apparaît dans le spectre, à la longueur d'onde de 587.6 nm, au voisinage des deux raies D du Sodium identifiées par Fraunhofer bien avant sur le disque solaire (figures 20, 21). Il s'agit d'un nouvel élément, que l'on décide de baptiser Hélium. C'est donc dans le Soleil que ce gaz, second constituant de l'Univers après l'Hydrogène, a été découvert.

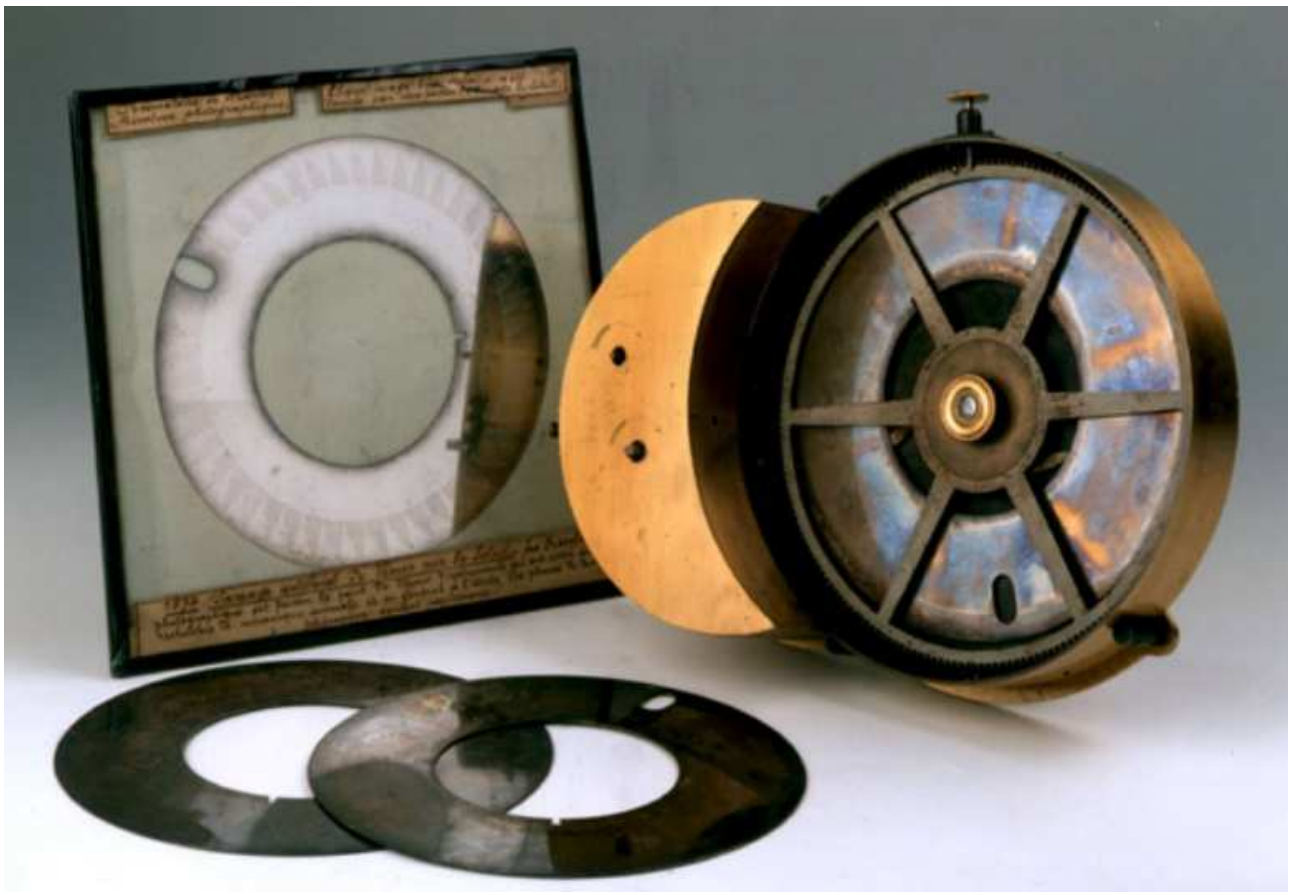


Figure 19 : Le révolver photographique de Janssen mettait en rotation une plaque photosensible circulaire (document obs. Paris). Il permit l'observation du transit de Vénus devant le Soleil en 1874.

Un an plus tard, lors de l'éclipse totale 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, sur la couronne solaire (figures 20, 22). Il n'y a aucune raie à cet endroit dans le spectre du disque solaire. Il s'agit là d'une autre interrogation majeure : Thomas Young a mis l'œil sur la première raie dite « interdite » de la couronne solaire (« interdite » parce qu'on ne peut l'observer que dans des milieux extrêmement dilués, à haute température, dans des conditions non reproductibles en laboratoire). Ne sachant identifier cette raie, il l'attribue à un nouvel élément chimique que l'on baptise « Coronium ». Il faudra en réalité 70 ans d'efforts pour comprendre que cette fameuse 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) : ce phénomène impose à la couronne solaire une température d'un million de degrés. On a constaté depuis la présence de bien d'autres raies « interdites » provenant d'atomes hautement ionisés, autant de témoins des conditions physiques extrêmes qui règnent dans la couronne solaire en termes de températures et densités.

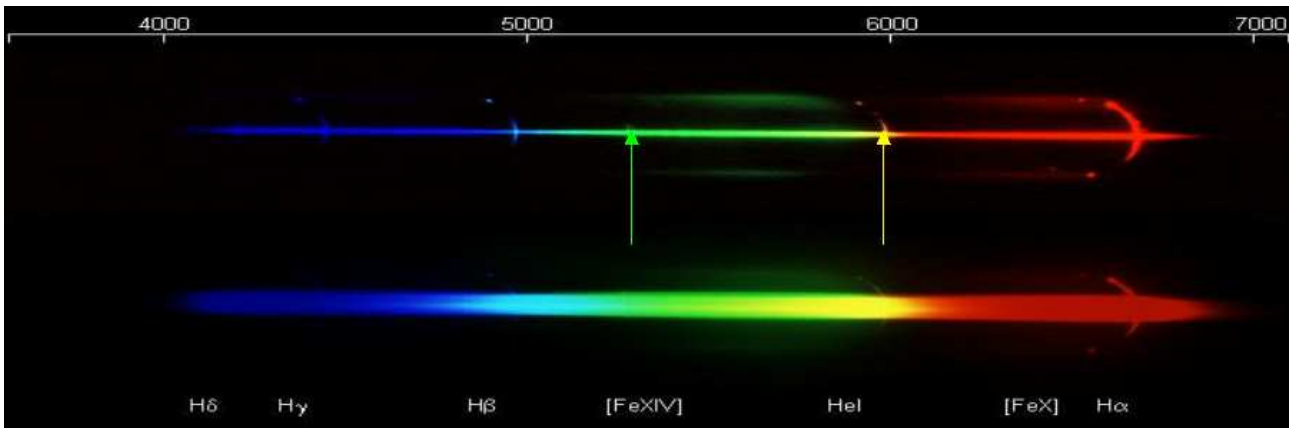


Figure 20 : Les flèches indiquent la raie verte du Coronium (ou Fer 13 fois ionisé) et la raie jaune D3 de l'Hélium, grandes victoires de la spectroscopie au XIX^{ème} siècle (document ESO, éclipse du 11 Août 1999)

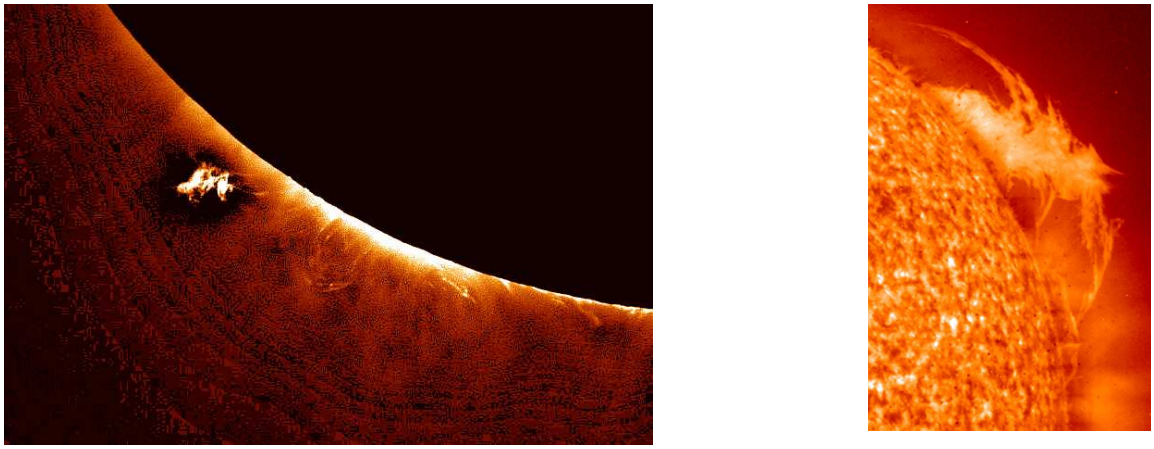


Figure 21 : Protubérances solaires dans la raie D3 de l'Hélium découverte par Janssen et Lockyer (à gauche, document Obs. Paris) et dans la raie de Lyman alpha de l'Hélium en Ultra Violet à 30.4 nm (à droite, instrument EIT sur SOHO). Ces objets sont des structures denses en suspension dans la couronne sous l'effet de champs magnétiques.

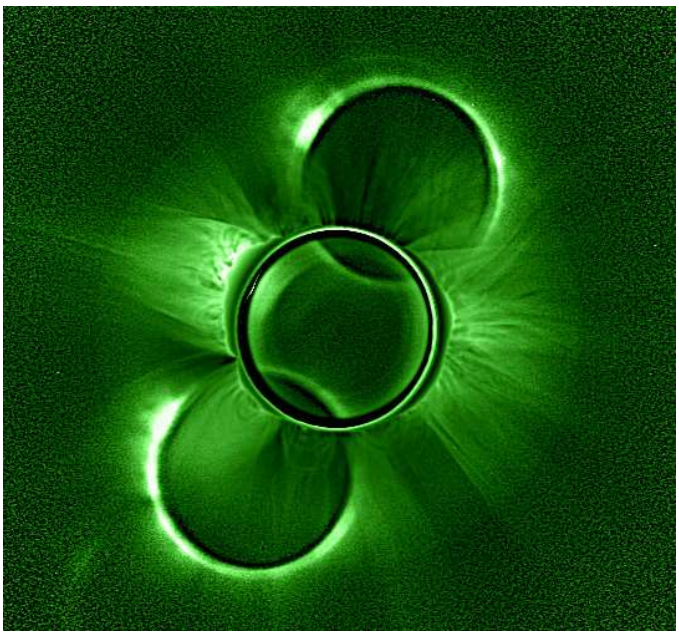


Figure 22 : Couronne solaire dans la raie « interdite » du « Coronium » (Fer 13 fois ionisé), mettant en évidence les grands jets coronaux d'électrons (mission de l'Institut d'Astrophysique de Paris du CNRS, les images de part et d'autre de l'image centrale sont des réflexions parasites)

La fin du XIX^{ème} siècle est marquée par la fondation de l'Observatoire de Meudon en 1876 par Jules Janssen où il introduit l'Astrophysique basée expérimentalement sur l'usage intensif de la photographie et de la spectroscopie. Equipé d'instruments respectables pour l'époque (Grande Lunette double de 18 m à deux objectifs, télescope de 1 m), Janssen complètera cette installation enviée par une station d'altitude peu banale : le sommet du Mont Blanc. Il souhaite profiter de l'altitude exceptionnelle du site pour séparer la composante tellurique de la composante solaire du spectre : en effet, plus on s'élève, et moins l'atmosphère au dessus de l'instrument de mesure est dense ; les raies spectrales de l'atmosphère terrestre s'effacent donc progressivement devant les raies solaires.

Figure 23 : Observatoire du Mont Blanc (1893-1909) créé par Janssen pour étudier le spectre solaire (Obs. Paris)

III - 1890 ou la découverte d'une anomalie du nombre de taches, le minimum de Maunder

L'observation des taches solaires a été plus ou moins continue durant le XVII^{ème} siècle, les astronomes les plus actifs dans ce domaine étant le polonais Johannes Hevelius (1611-1687) et les français Jean Picard (1620-1682) puis Philippe de la Hire (1640-1719) de l'Observatoire de Paris. Hevelius possède à son actif quatre mille jours d'observations entre 1642 et 1684. Cependant, très peu de taches furent observées entre 1645 et 1705 (figure 24), époque où l'apparition d'une tache était souvent notée comme un évènement par les astronomes. Durant cette période, un programme d'observations du soleil fut lancé par Jean Dominique Cassini (1625-1712) à l'Observatoire de Paris

fondé en 1667, et les observations furent effectuées par Jean Picard, puis par Philippe de La Hire. Les reconstructions historiques démontrent que ce déficit de taches solaires n'est absolument pas dû à un manque d'observations des astronomes de l'époque, mais est bien réel. Une baisse dans le nombre d'aurores boréales observées à cette époque (phénomène provoqué par l'activité solaire) corrobore l'idée que le soleil fut très peu actif durant plusieurs décennies. Jean Dominique Cassini, dans les annales de l'Académie des Sciences, écrit en 1676 : « c'est la troisième tache qui a paru en cette année 1676, dans laquelle elles ont été plus fréquentes qu'elles n'avoient été pendant les vingt années précédentes…Elle fut aperçue par Monsieur Picard en prenant la hauteur du Soleil pour la rectification des horloges le matin du trentième d'Octobre… ».

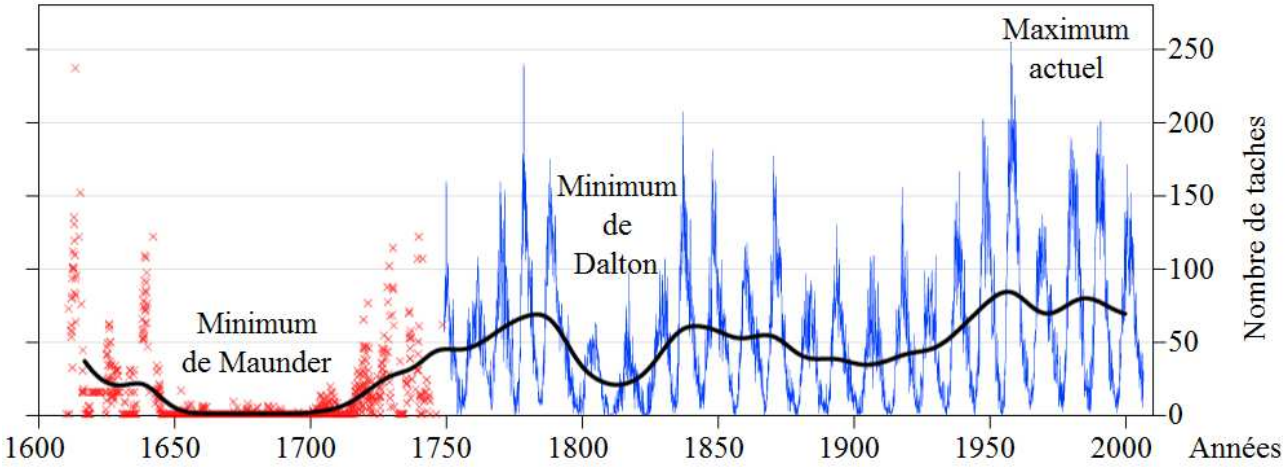


Figure 24 : Evolution du nombre de taches solaires en fonction du temps, document Wikimedia Commons, Robert A. Rohde, sous license GFDL, mettant en évidence deux anomalies du cycle solaire (minima de Maunder et Dalton)

Cette période d'activité solaire réduite est connue sous le nom de Minimum de Maunder, en honneur de l'astronome anglais Edward Maunder (1851-1928). Maunder étendit les études historiques entreprises par l'allemand Gustav Spörer (1822-1895), qui laissa lui même son nom au minimum de Spörer présumé entre 1420 et 1570 par examen de la variation de l'isotope ^{14}C dans les anneaux de croissance des arbres. Spörer, puis Maunder, ont remarqué le déficit de taches solaires dans les observations des astronomes au cours de la seconde moitié du XVII^{ème} siècle. On a constaté un refroidissement de la température moyenne durant cette même époque et avant (le « petit âge glaciaire » en climatologie, de 1550 à 1850 environ) : il est possible qu'il y ait une corrélation avec le niveau anormalement faible de l'activité solaire, bien que cette supposition soit aujourd'hui controversée. De nombreuses interprétations ont été proposées par plusieurs équipes après analyse des séries d'observations faites par les astronomes de l'époque. Une diminution des aurores boréales a également été retrouvée à partir de la lecture des archives et des chroniques retrouvées notamment en Russie (figure 25).

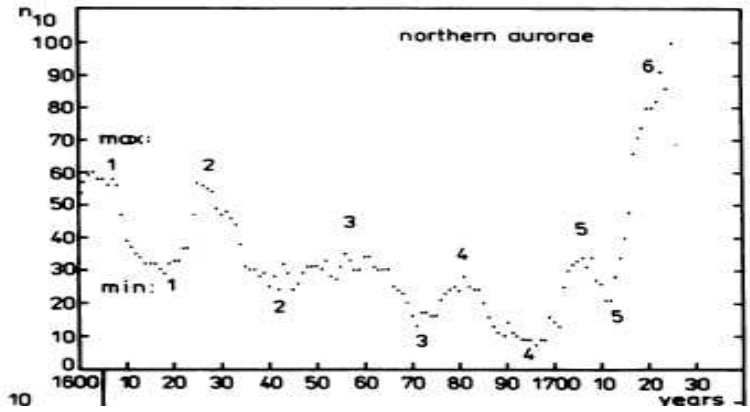


*Figure 25 : Observations des aurores boréales au XVII*ème *siècle selon la reconstruction de Krivsky, 1986. la fréquence des aurores boréales est liée à l'activité solaire. Il y a un creux entre 1650 et 1700, bien corrélé au déficit de taches sur le Soleil. On note que le cycle solaire n'a néanmoins pas disparu pendant ces années.*

Jean-Pierre Legrand et al (1990), en étudiant 40 ans de données météorologiques obtenues à Paris entre 1676 et 1712, ont mis en évidence une baisse des températures moyennes de l'ordre de 0.8°C, notamment entre 1690 et 1700. Pendant cette décade, les observations de l'Observatoire de Paris montrent que l'activité solaire, en raison du déficit en taches, était très faible. La remontée de l'activité se fait à partir de 1710, comme le montre également le graphique des aurores boréales (figure 25).

Les fluctuations de température pourraient être liées aux variations de l'irradiance solaire ou flux moyen d'énergie reçu par la Terre (voisin de 1365 W/m²). La reconstitution approximative des températures anciennes (lorsqu'on ne disposait pas des thermomètres) passe, au moyen de modèles, par la reconstitution de l'irradiance ; comme la détermination de cette quantité a dû attendre l'ère spatiale pour avoir une précision convenable, elle est elle même basée sur la reconstruction de l'activité solaire à partir des taches. Mais, comme au delà de 400 ans, on ne dispose pas d'observations, on utilise ce qu'on appelle des « proxies », c'est à dire des quantités reliées à l'activité solaire et mesurables comme la concentration des isotopes cosmogéniques, parce qu'on a noté une bonne corrélation entre leur concentration, l'irradiance et l'activité solaire aux époques modernes où les mesures permettent d'effectuer des comparaisons minutieuses.

Le nombre de taches était resté relativement élevé, ainsi que l'activité aurorale, dans certaines périodes froides du petit âge glaciaire (avant 1650). Pour cette raison, les données historiques et très précieuses du XVIIème siècle indiquent qu'il serait bien imprudent d'affirmer l'existence d'une relation sûre entre le refroidissement climatique et la baisse d'irradiance engendrée vraisemblablement par la réduction de l'activité solaire au minimum de Maunder (figure 26).

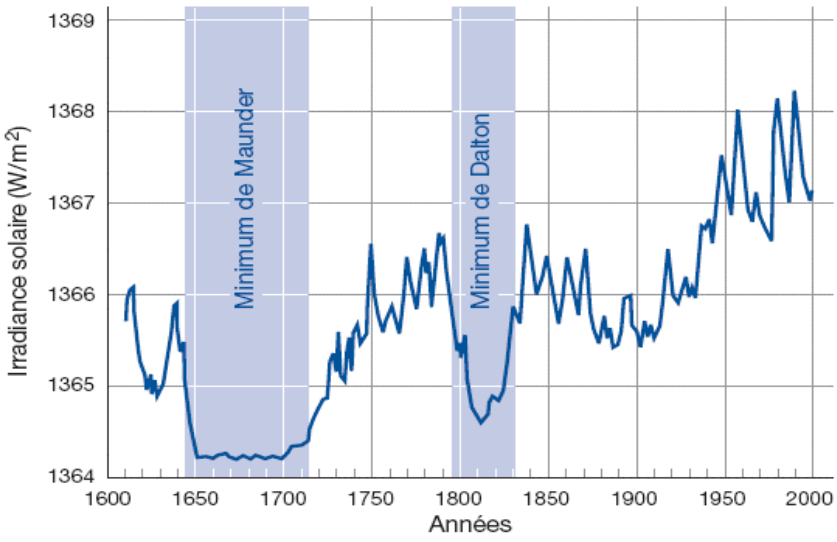


Figure 26 : Reconstruction de l'irradiance solaire en W/m². L'irradiance est plus élevée lors des maxima d'activité solaire ; une explication possible serait liée à la surface couverte par les facules brillantes, zones chaudes entourant les taches froides et dont la surface est bien plus importante que celle des taches (d'après Judith Lean et al, 1995, et Maura Vonmoos, EAWAG news 58).

Avant l'observation des taches, la reconstruction de l'activité solaire est donc basée sur des « proxies » dont nous donnons maintenant quelques détails. Parmi ces « proxies » , on trouve :

- l'isotope Carbone 14 (^{14}C, deux neutrons excédentaires) qui est principalement confiné dans l'atmosphère, les sédiments et la matière organique. ^{14}C est un isotope radioactif de demi vie 5700 ans (utilisé par ailleurs en datation) qui se forme dans l'atmosphère terrestre par interaction des neutrons du rayonnement cosmique avec l'azote selon la réaction $^{0}_{1}n + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{14}_{6}C + {}^{0}_{1}H$. La proportion de ^{14}C au carbone ^{12}C reste constante dans l'atmosphère et la biosphère en raison des échanges permanents entre les organismes vivants et leur milieu (elle décroît après leur mort). Mais plus l'activité solaire est intense et moins il y a de ^{14}C produit dans la haute atmosphère, car le vent solaire, qui véhicule le champ magnétique solaire dans le milieu interplanétaire, dévie les rayons cosmiques qui produisent le ^{14}C. Les mesures de concentration de ^{14}C sont effectuées dans les carottages glaciaires, les coraux ou les anneaux de croissance des arbres, qui en conservent la mémoire au cours du temps. On a pu remonter plusieurs milliers d'années derrière notre ère avec cet isotope (figure 27).

- L'isotope Beryllium 10 (^{10}Be, deux neutrons excédentaires) est également un isotope cosmogénique (demi vie de 1.3 million d'années) créé dans la haute atmosphère (8-15 km d'altitude) par les rayons cosmiques par action sur l'azote et l'oxygène. On mesure sa concentration dans les carottages glaciaires, ce qui permet de remonter dans le temps sur de longues périodes. Comme le flux de rayons cosmiques est lié au champ magnétique transporté par le vent solaire, la concentration de ^{10}Be reflète l'activité

solaire. Elle décroît lorsque l'activité solaire est intense (il peut y avoir un déphasage dû au temps de mélange dans l'environnement terrestre). Les mesures (figure 28) montrent que, même pendant le minimum de Maunder, le cycle d'activité solaire de 11 ans n'a pas cessé ; néanmoins, on constate que la concentration en ^{10}Be présente un pic prononcé vers la fin du XVII^{ème} siècle, bien en accord avec celui de ^{14}C, marquant une activité solaire très réduite.

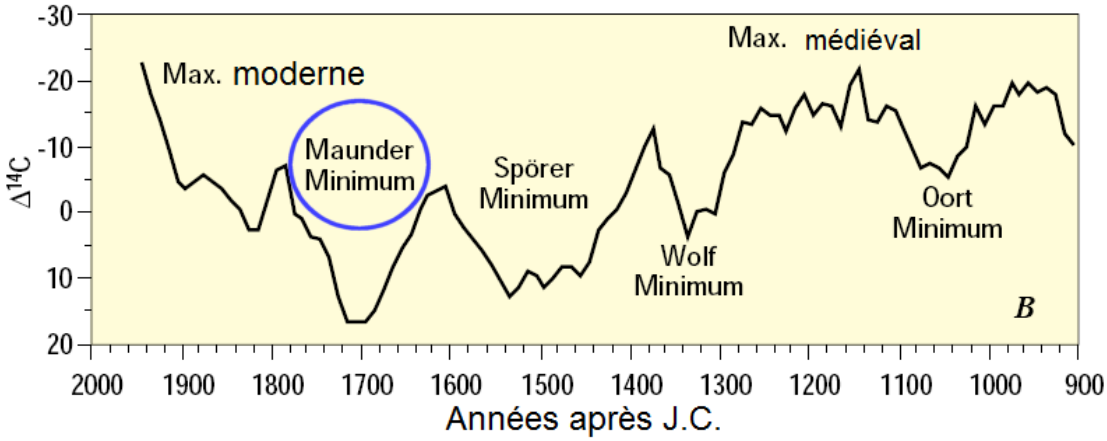


Figure 27 : L'activité solaire reconstituée à partir de la variation de concentration en ^{14}C qui est plus forte lors des minima prononcés d'activité (Maunder, Spörer, Wolf, Oort). Document Wikimedia Commons, licence GFDL.

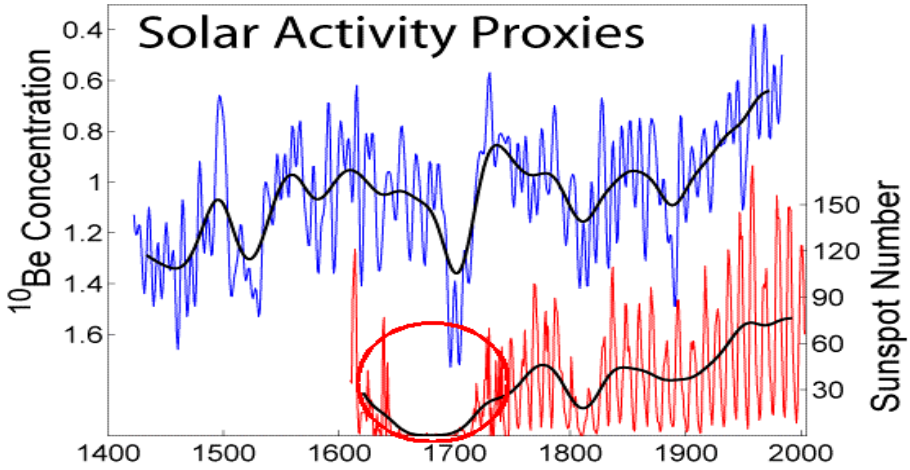


Figure 28 : Corrélation ^{10}Be (en bleu) et nombre de taches (en rouge) à la surface du soleil. Le minimum de Maunder est indiqué par le rond rouge (document Wikimedia Commons, Robert Rhode, licence GFDL).

La figure 29, à partir de mesures modernes d'irradiance solaire, établit clairement le lien direct qui existe entre le nombre des taches et le flux d'énergie en Watts par mètre carré qui atteint la Terre. Le comptage des taches, ou plus loin dans le passé le recours aux isotopes cosmogéniques, permet donc de reconstituer les variations d'irradiance solaire avec une bonne fidélité (le Soleil est plus lumineux en période de maximum d'activité, moins lumineux en période de minimum).

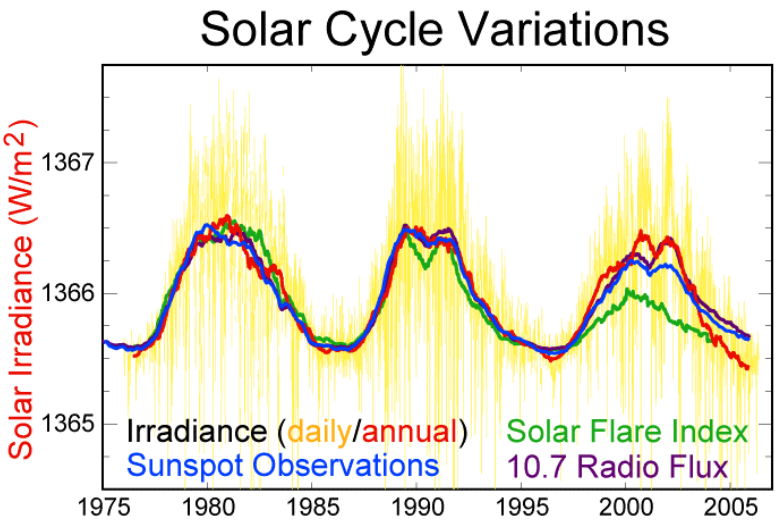


Figure 29 : Analyse des corrélations au cours des trente dernières années entre le nombre de taches (bleu), les mesures d'irradiance (rouge), et d'autres indicateurs (document Wikimedia Commons, Robert Rhode, licence GFDL)

A partir de l'irradiance, on reconstitue à l'aide de modèles les fluctuations des températures comme illustré ci dessous (figure 30) :

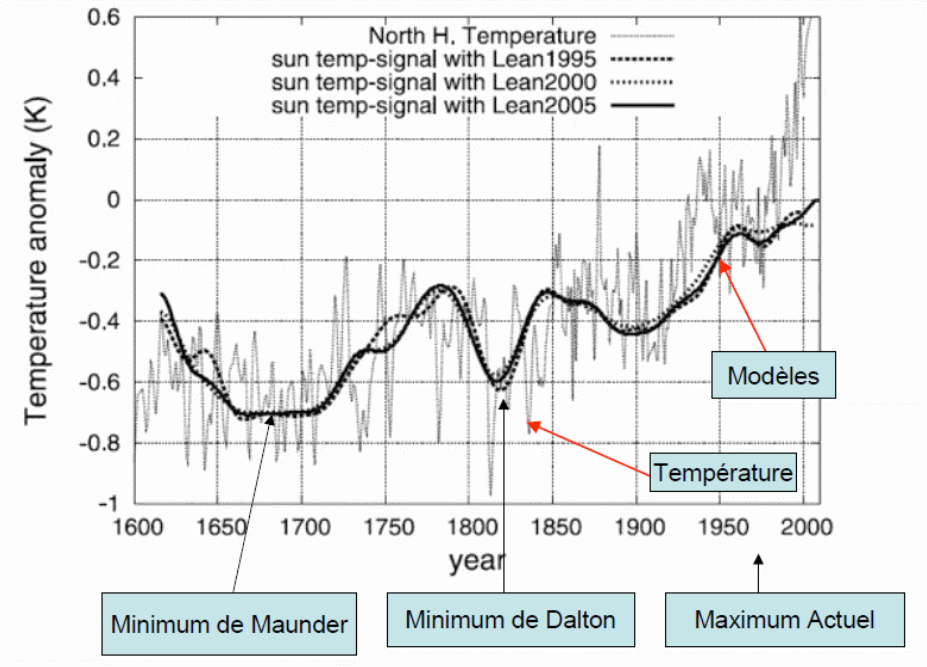


Figure 30 : Température observée (trait fin) et modélisée (trait épais) par Judith Lean et al à partir des variations de l'irradiance solaire ou puissance reçue par la Terre en W/m², marquant un déficit aux minima de Maunder (1650-1700) et de Dalton (1800-1820). On note que la reconstruction des températures basée sur l'irradiance solaire s'écarte des températures observées depuis les trente dernières années (Document Gérard Thuillier, LATMOS, CNRS)

On remarquera qu'il s'agit de minuscules fluctuations qui ne doivent pas être confondues avec les variations plus fortes (alternance de périodes de glaciation et de périodes chaudes) pour lesquelles Milankovitch a proposé une théorie astronomique. On sait en effet que l'inclinaison de l'axe des pôles terrestres sur le plan de l'écliptique n'est pas constante mais varie de 22 à 24.5° (nutation). Ce même axe effectue un mouvement de précession en 26000 ans. L'excentricité de l'orbite terrestre autour du Soleil est également variable dans le temps avec périodicité de l'ordre de 100000 ans: de circulaire (excentricité nulle) l'orbite peut devenir assez elliptique (excentricité maximale 0.06, aujourd'hui 0.017). La combinaison de ces trois mouvements a conduit Milankovitch en 1941 à expliquer que l'alternance des périodes glaciaires et interglaciaires serait liée aux variations d'ensoleillement en raison, non pas de fluctuations solaires, mais des évolutions cycliques de l'orbitographie de la Terre autour du Soleil.

La reconstruction des températures terrestres sur le long terme passe par l'observation de la concentration d'autres isotopes, comme le Deutérium ^{2}H (isotope de l'Hydrogène avec un neutron excédentaire) ou l'Oxygène 18 (^{18}O, deux neutrons excédentaires) dans les glaces polaires qui en conservent la mémoire. Ces éléments sont les constituants de l'eau. Leurs isotopes sont plus lourds, ce qui fait que l'eau lourde à base de ces isotopes précipite plus vite dans l'atmosphère. En période froide, les masses d'air humides migrant des tropiques vers les pôles s'appauvrissent rapidement, par précipitation aux latitudes intermédiaires, en eau lourde ; pour cette raison, l'abondance de Deutérium ou d'Oxygène 18 dans les glaces est faible. Inversement, en période chaude, les précipitations surviennent à plus haute latitude, et les glaces polaires sont ainsi plus concentrées en eau lourde. Les géophysiciens ont établi une relation étroite entre la température et l'abondance isotopique dans les glaces polaires. A l'aide de ce « thermomètre isotopique », il devient possible de reconstruire l'historique des températures terrestres.

IV - L'anomalie de rotation et de position des taches au minimum de Maunder

Les fluctuations de la rotation solaire (moyenne et différentielle selon la latitude) ont été examinées récemment par différents auteurs à partir d'observations réalisées à deux époques dans la première moitié du XVII^{ème} siècle ; de 1625 à 1626 (observations de Christoph Scheiner dans Rosa Ursina) et de 1642 à 1644 (observations d'Hevelius dans Selenographia). Scheiner, et surtout Hevelius, ont été des observateurs assidus. Hevelius ne totalise pas moins de 4000 jours d'observation entre 1642 et 1684 !

La première période d'observation considérée (Scheiner) survient 20 ans avant le début du minimum de Maunder, qui a duré de 1645 à 1705. La seconde période (Hevelius) a eu lieu juste à son commencement. La vitesse de rotation des taches (donc du Soleil sur son axe) avant le minimum de Maunder était peu différente de celle d'aujourd'hui.

Mais au cours de la seconde période (Hevelius), la vitesse équatoriale du Soleil aurait pu être légèrement plus rapide (3% à 5%), et la rotation différentielle (les taches tournent plus vite à l'équateur qu'aux hautes latitudes) aurait pu être nettement plus accentuée, suggérant une accélération équatoriale au moment ou l'activité déclinait. Ainsi, il est imaginable que cette modification de la rotation solaire soit associée avec le commencement du minimum de Maunder, comme le suggèrent Eddy et al (Solar Physics, 1976 et Science, 1977). Cependant, il est intéressant de noter qu'Abarbanell et Wöhl ont trouvé, avec les mêmes données d'Hevelius, des résultats plutôt en contradiction (Solar Physics, 1977), avec peu de différences notables par rapport aux valeurs contemporaines.

Ribes et al (1993) ont étudié les données obtenues par Jean Picard, puis par Philippe de La Hire, entre la fondation de l'Observatoire de Paris en 1667 et la fin du XVII^{ème} siècle jusqu'au début du XVIII^{ème}, c'est à dire la période du minimum de Maunder « profond », puis sa sortie vers 1710. Picard et La Hire totalisent à eux deux 13000 jours d'observations ! Ainsi que le montre le diagramme « papillon » ci dessous, les taches observées ont toujours été vues au voisinage de l'équateur, et on a noté jusqu'en 1710 une absence quasi totale de taches dans l'hémisphère Nord (figure 31). On sait aujourd'hui, avec le recul et les observations plus récentes, qu'il s'agit d'une anomalie. Au cours d'un cycle solaire de 11 ans, les taches se répartissent entre ± 40° de latitude, sans asymétrie marquée entre les deux hémisphères. Nous n'avons pas aujourd'hui d'explication définitive de ces phénomènes absolument remarquables. Sokoloff et Nesme-Ribes (1994) ont suggéré que des dynamos non linéaires pourraient aboutir à des situations de forte asymétrie Nord Sud et proposé un modèle de configuration magnétique dipolaire dominante en présence d'un faible champ quadrupolaire.

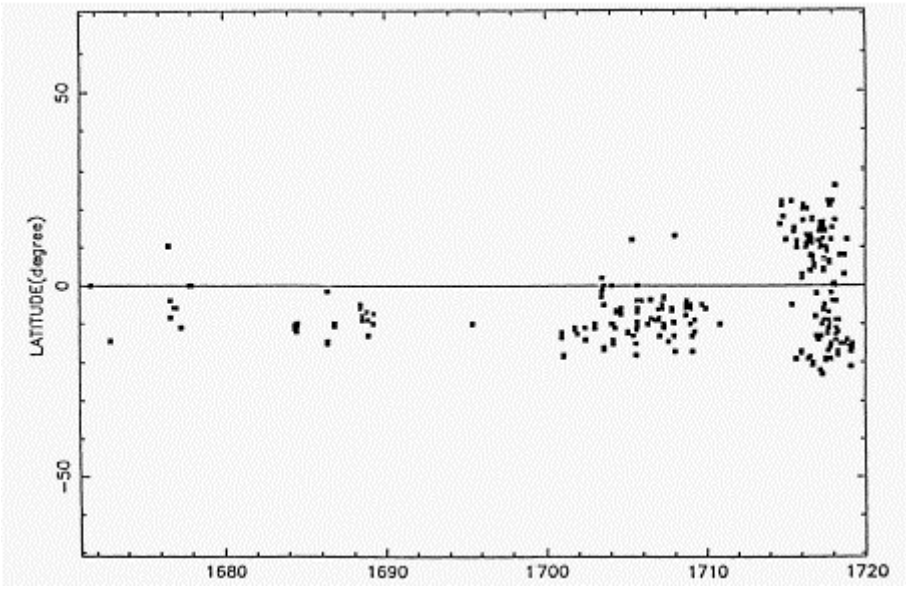


Figure 31 : Position des taches en latitude au minimum de Maunder d'après 50 ans d'observations de Picard et La Hire, interprétées par Ribes et al (1993). Noter l'anomalie de l'hémisphère Nord jusqu'en 1710 et les faibles latitudes de formation des taches autour de l'équateur. La latitude de formation ne remonte qu'à la sortie du Minimum de Maunder.

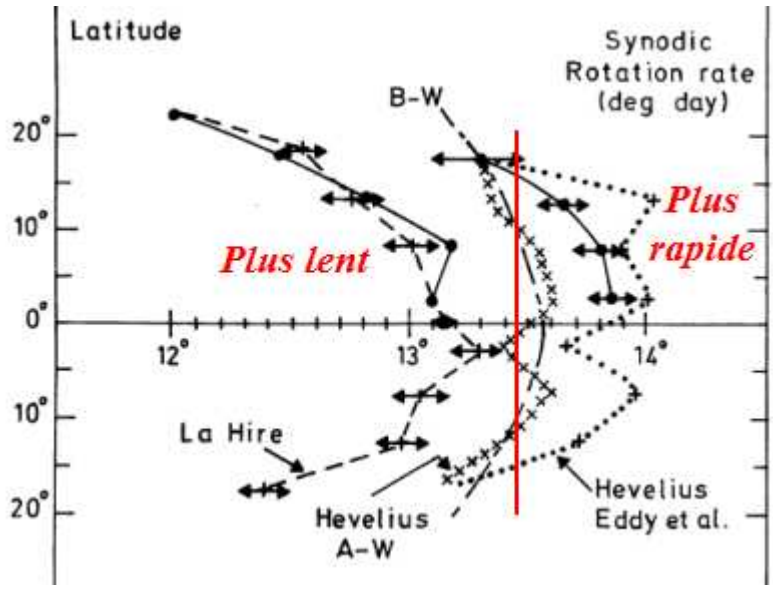


Figure 32 : Vitesse de rotation des taches en degré par jour au minimum de Maunder d'après les observations de Picard et La Hire (1667-1719) et de Hevelius (1642-1644). Il y a contradiction apparente, mais il s'agit d'observations décalées dans le temps. Reconstruction de Ribes et al (1988) sur les données de Picard et La Hire. Les observations d'Hevelius (à droite) ont été interprétées par Eddy et al (1976) et Abarbanell et Wöhl (1977, noté A-W). La rotation actuelle est dénotée par B-W (détermination de Balthasar et Wöhl, 1986).

Ribes et al (1988) ont aussi étudié le mouvement de rotation des taches (figure 32). La longue série d'observations faite par Picard puis La Hire entre 1667 et 1715 montre (contrairement aux observations plus anciennes d'Hevelius interprétées par Eddy et al, puis Abarbanell et Wöhl) que le Soleil aurait tourné moins vite qu'aujourd'hui durant le minimum de Maunder « profond ». Sa rotation différentielle semblait plus marquée qu'aujourd'hui (c'est également ce qu'a conclu Eddy sur ce point précis à partir des observations d'Hevelius faites entre 1642 et 1644 juste au début du minimum de Maunder, mais Abarbanell et Wöhl n'ont pas confirmé son résultat). On constate en survolant ces interprétations qu'aucune conclusion définitive ne peut être avancée ; néanmoins, les données anciennes nous interpellent sur de possibles variations de rotation lors du minimum de Maunder.

V - Le diamètre angulaire du soleil au minimum de Maunder

La lunette de Galilée, d'abord munie d'une lentille divergente en guise d'oculaire, fut ensuite équipée par Kepler d'un oculaire convergent (une loupe), qu'améliora ensuite Huygens. Ces lunettes servaient à l'observation à l'oeil ou par projection sur un écran (papier). Dès la fondation de l'Observatoire de Paris, l'abbé Jean Picard, l'un des premiers membres de l'Académie des Sciences en 1666, s'emploie à réaliser des observations du diamètre solaire. C'est le début d'une nouvelle ère : la lunette, instrument d'imagerie, va devenir un instrument de mesure de précision. Picard conçoit lui-

même ses appareils de mesure et il est le premier à utiliser dès 1667 une lunette munie d'un oculaire micromètrique à fil mobile, initialement conçu par Adrien Auzout (1622-1691), lui aussi membre de l'Académie et astronome. Picard effectue ses observations à l'aide d'un quart de cercle de 9,5 pieds et de 2 m de distance focale. Il parvient à faire des mesures dont la précision atteint la seconde de degré, une véritable prouesse pour l'époque. La mesure du diamètre solaire revêt aujourd'hui une importance considérable, car ses infimes variations (moins de la seconde de degré) pourraient conditionner la luminosité de l'étoile. Néanmoins, à l'époque on ne s'intéressait pas à de telles fluctuations du diamètre apparent ; il importait plutôt de connaître l'excentricité de l'orbite de la Terre dont l'impact sur le diamètre apparent atteint la minute de degré.

no	author	date	method	N	R1(")
1	Mouton	1660	PP	86	959.4
2	Auzout	1666	MI	2	965.2
3	**Picard**	1670	MI	304	964.6
4	Richer	1672	DP	26	961.9
5	**Picard**	1674	DP	154	962.9
6	La Hire	1683	MI	14	963.2
7	**La Hire**	1684	DP	304	965.4
8	La Hire	1701	DP	6980	963.6
9	Louville	1724	DP	10	962.4
10	Bouguer	1753	HE	14	957.3
11	**Mayer**	1759	DP	105	960.4
12	Lalande	1760	HE	12	961.1
13	Lalande	1764	HE	12	961.4

Table 1 : Observations du rayon solaire (d'après Michel Toulmonde). N est le nombre d'observations. Différentes méthodes ont été employées (PP = transit par projection, MI = micromètre, DP = chronométrages des passages, HE = héliomètre). R est le rayon solaire mesuré en secondes de degré.

Puis son élève Philippe de la Hire prend le relais, mais cette fois ci, il utilise une autre méthode, celle des passages ou des transits, qui se développe grâce au gain en précision des horloges à pendule, introduites par Huygens en 1656. Les horloges affichent désormais la seconde ou même la demi-seconde, et sont capables de tenir la seconde sur plusieurs jours d'affilée; La Hire utilise un quart de cercle mural et peut ainsi chronométrer le temps de passage du Soleil au méridien (ce phénomène dure environ 2 minutes) avec une précision d'une demi seconde, lui donnant une incertitude de quelques secondes de degré sur la valeur du diamètre solaire.

Les mesures de Picard et La Hire ont été patiemment redécouvertes et étudiées par Elizabeth Nesme-Ribes, à l'Observatoire de Paris. Il ressort de ces mesures historiques et magnifiques (figure 33) que le Soleil aurait pu présenter un diamètre supérieur de 7 secondes de degré au minimum de Mauder par rapport aux mesures contemporaines. Au même moment, les observations de La Hire suggèrent que la rotation des taches aurait pu être plus lente qu'actuellement à l'équateur, mais par contre la rotation différentielle plus accentuée qu'aujourd'hui. L'interprétation de ces résultats favorise l'hypothèse d'une expansion et d'une contraction cyclique de l'atmosphère solaire à

l'échelle séculaire. Selon ces auteurs, vers la fin du minimum de Maunder (1685), le diamètre solaire aurait décru de 3 secondes de degré.

Axel Wittmann (1979) a utilisé de son côté les données plus récentes de Tobias Mayer, au XVIII^{ème} siècle, bien après le minimum de Maunder (1723-1762), obtenues par la méthode des passages, à Göttingen en Allemagne entre 1756 et 1760. Cette reconstruction du diamètre solaire, basée sur 129 passages, n'a pas donné pas de valeur différente de celle d'aujourd'hui (960 secondes de degré).

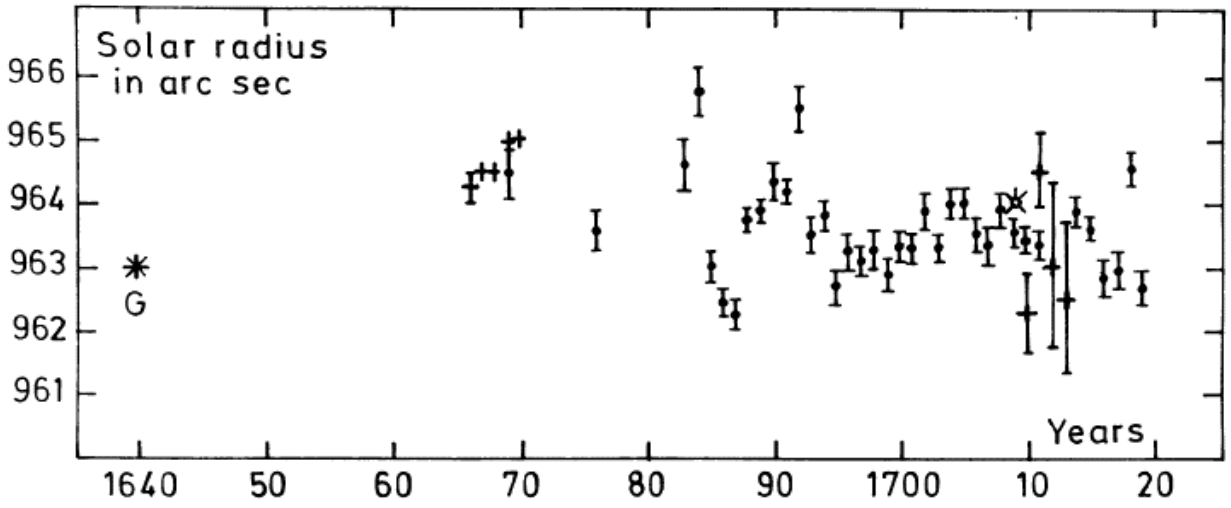


Figure 33 : Rayon angulaire solaire au minimum de Maunder d'après les observations micrométriques (+) ou de transits ou passages (●). Le symbole ☼ réfère à une éclipse. Reconstruction de Ribes et al (1993, Astron. Astrophys.).

Michel Toulmonde, de l'Observatoire de Paris (1997), a effectué une compilation de toutes les mesures de diamètre solaire faites depuis 1650 (table 1, hormis les mesures d'éclipses et les observations ballon du XX^{ème} siècle) et a conclu que les variations mesurées par différents auteurs (figure 34) pourraient être fictives et imputables à des effets instrumentaux non corrigés. On réalise que les mesures du diamètre pratiquées au sol, d'hier et d'aujourd'hui, sont extrêmement délicates en raison des perturbations de l'atmosphère terrestre et aucune conclusion sûre ne peut encore être formulée. C'est la raison pour laquelle les résultats du satellite PICARD du CNES, à partir de 2010, sont très attendus.

Le XVII^{ème} siècle nous a donc légué bien des énigmes et des interrogations concernant la variabilité solaire et la « machinerie » solaire : les observations régulières des taches nous sollicitent sur le minimum de Maunder, ses relations avec le climat terrestre, et ses origines en terme de physique solaire (effet dynamo). D'autres minima sont d'ailleurs sortis des observations plus récentes (Dalton au début du XIX^{ème} siècle), et les relevés des isotopes cosmogéniques conservés dans la mémoire de la Terre ont révélé l'existence d'autres faiblesses de l'activité solaire (minima de Spörer, Wolf, Oort) dans un passé plus lointain. Avec le réchauffement climatique de l'ère industrielle, la paléoclimatologie dans ses relations avec le Soleil se voit questionnée : quelle est

l'influence de la variabilité solaire ? Certains n'hésitent pas, en se basant sur le cycle de Gleissberg de 80-90 ans qui semble moduler l'amplitude du cycle d'activité solaire de 11 ans, à annoncer qu'une nouvelle période peu active pourrait survenir vers 2030, venant s'opposer au réchauffement contemporain. De telles prédictions nous semblent hasardeuses : qui avait prévu, par exemple, que le minimum local de 2008 serait le plus creux depuis 50 ans, voire 100 ans ?

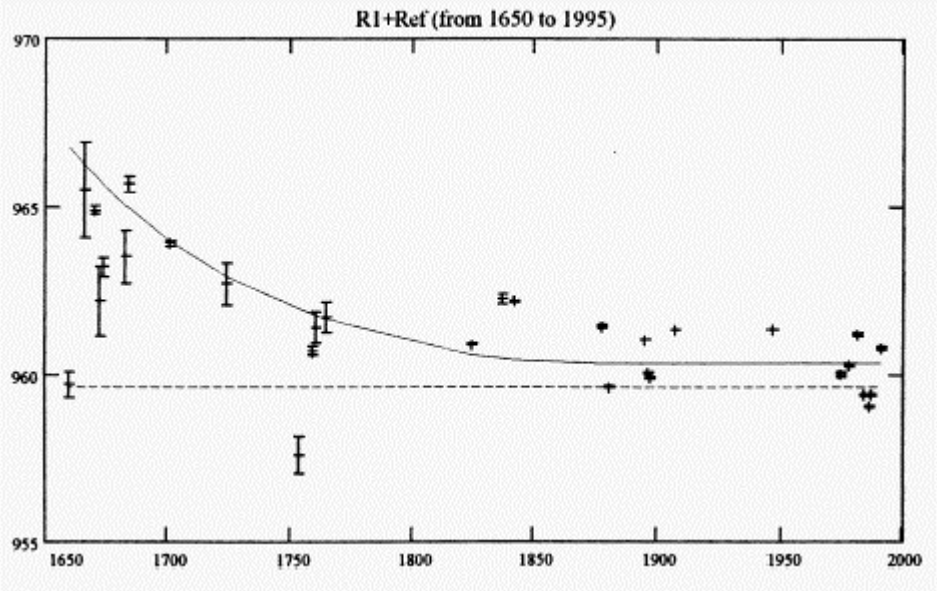


Figure 34 : Compilation des mesures du rayon angulaire solaire par Michel Toulmonde (1997, Astron. Astrophys.) de 1650 à nos jours, à l'exclusion des mesures obtenues par les éclipses et les mesures en ballon.

VI – Vers l'époque moderne

Revenons au XIX^{ème} siècle, que nous avons laissé au moment de la découverte du minimum de Maunder. Le véritable triomphe de la spectroscopie qui permit de découvrir l'Hélium et les raies « interdites » de la couronne solaire va entraîner une accélération de l'étude de l'atmosphère du Soleil. Cette activité ne va cesser de se développer à l'Observatoire de Meudon fondé en 1876 par l'astronome Jules Janssen, sur le domaine de Meudon laissé en friche par l'armée et dont le château neuf était considérablement dégradé. Janssen recherchait un terrain suffisamment vaste pour introduire une nouvelle discipline, l'Astronomie Physique, qu'on appelle de nos jours Astrophysique. En vingt ans, le Château sera restauré et une grande coupole abritant la plus puissante lunette d'Europe le coiffera. Janssen posera les bases de l'imagerie de la surface solaire à haute résolution (figure 35) et s'intéressera à la spectroscopie avec son collaborateur Henri Deslandres 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.

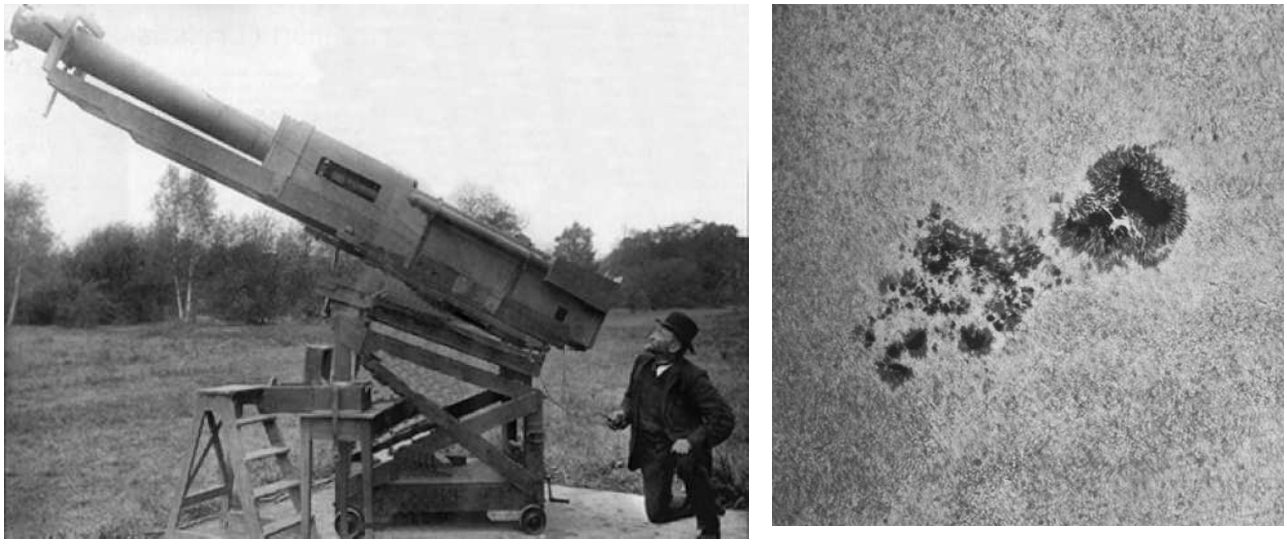


Figure 35 : Lunette solaire de Janssen et photographie des taches à haute résolution (clichés Obs. Paris)

Henri Deslandres (1843-1948) met au point au tournant du XIX^{ème} siècle un instrument original, le spectrohéliographe, qui a servi (et sert encore après maintes modernisations) a produire une collection d'images spectrales en bande étroite unique au monde de 9 cycles solaires consécutifs de la photosphère et de la chromosphère. Ces images (figure 36) répondent aujourd'hui à deux objectifs : scientifique et appliqué, en termes de prévision et de suivi de l'environnement spatial de la Terre baigné dans le vent solaire qui propage la variabilité solaire dans le milieu interplanétaire.

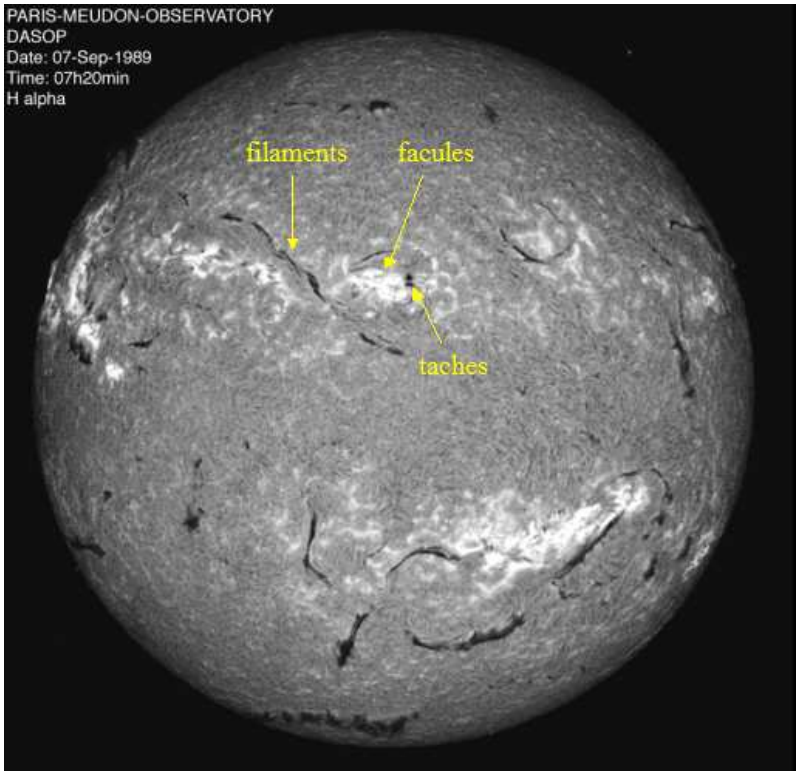


Figure 36 : Le spectrohéliographe de Deslandres produit depuis plus d'un siècle des images monochromatiques de l'atmosphère solaire qui permettent d'étudier la variabilité de l'étoile grâce à des observations systématiques et quotidiennes (document Obs. Paris)

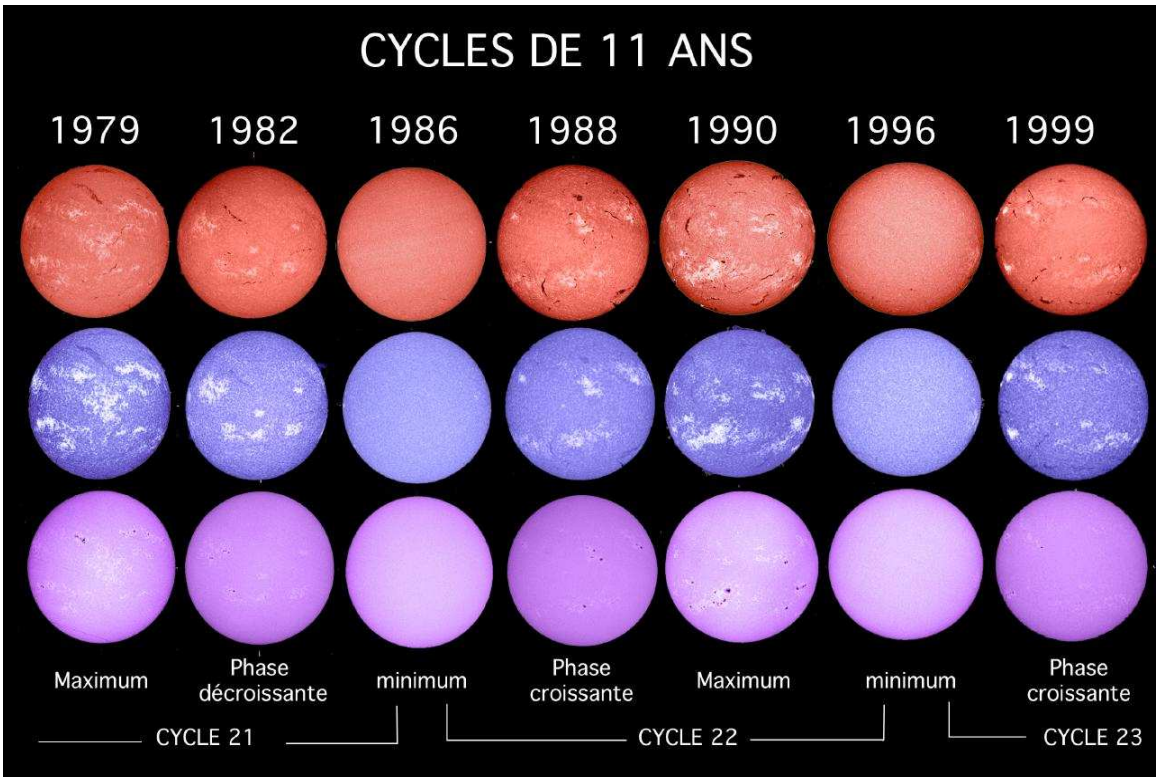


Figure 37 : Le cycle solaire observé au spectrohéliographe de Deslandres dans plusieurs domaines spectraux, la raie H alpha de l'Hydrogène (en haut), le cœur de la raie K du Calcium ionisé (au milieu) et l'aile bleue de la raie K (en bas), fournissant plusieurs visions de la photosphère et de la chromosphère (document Obs. Paris)

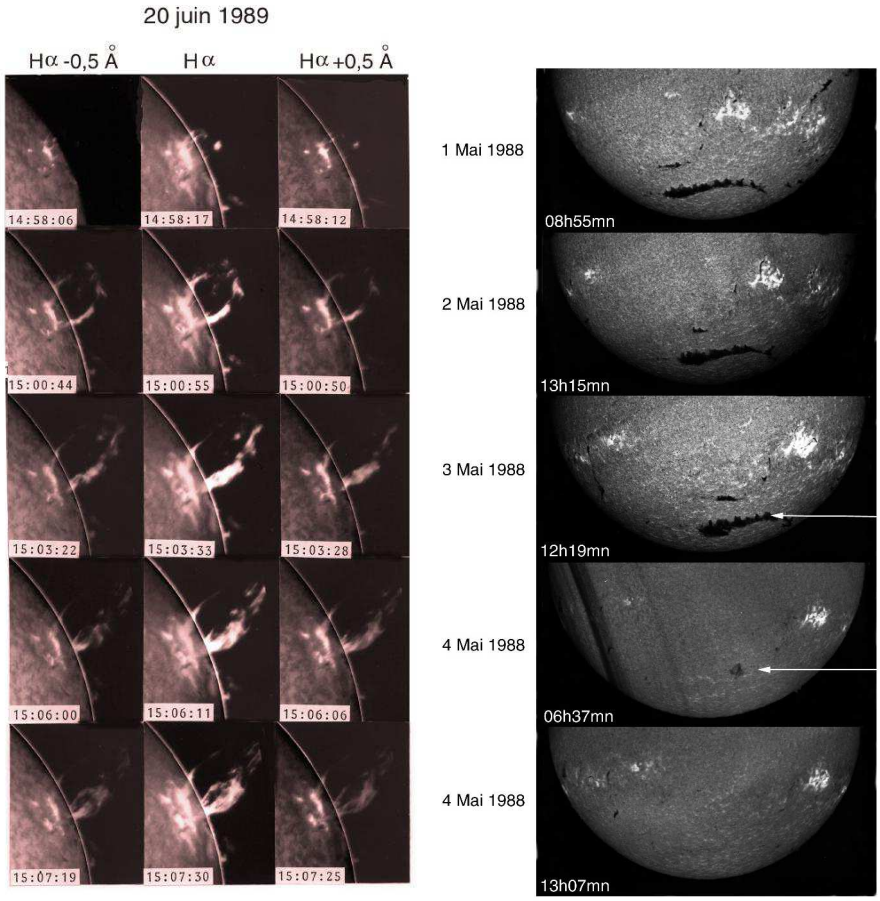


Figure 38 : Le Soleil est dynamique et évolue en permanence : à gauche une éruption qui se développe en quelques minutes ; à droite la déstabilisation d'un filament, plus lente, s'étale sur quelques heures (documents Obs. Paris, héliographe monochromatique et spectrohéliographe).

George Hale (1868-1938) eut la même idée aux Etats Unis et développa indépendamment de Deslandres un spectrohéliographe similaire. Il fit en 1908 une découverte majeure : on lui doit l'identification de la nature magnétique des taches solaires dans lesquelles il reconnait l'effet Zeeman, dévoilé en 1886 (figure 39). Lorsqu'un atome est plongé dans un champ magnétique, on assiste à un dédoublement des raies spectrales dont l'écartement est proportionnel à la valeur du champ magnétique. La mesure de cet écartement, au moyen d'un spectrographe et d'un polarimètre, permet ainsi d'établir la cartographie des champs magnétiques solaires. Dans la foulée de cette découverte importante, George Hale montrera en 1919 que le cycle magnétique solaire est de 22 ans avec un renversement des polarités entre les deux hémisphères tous les 11 ans (figure 40).

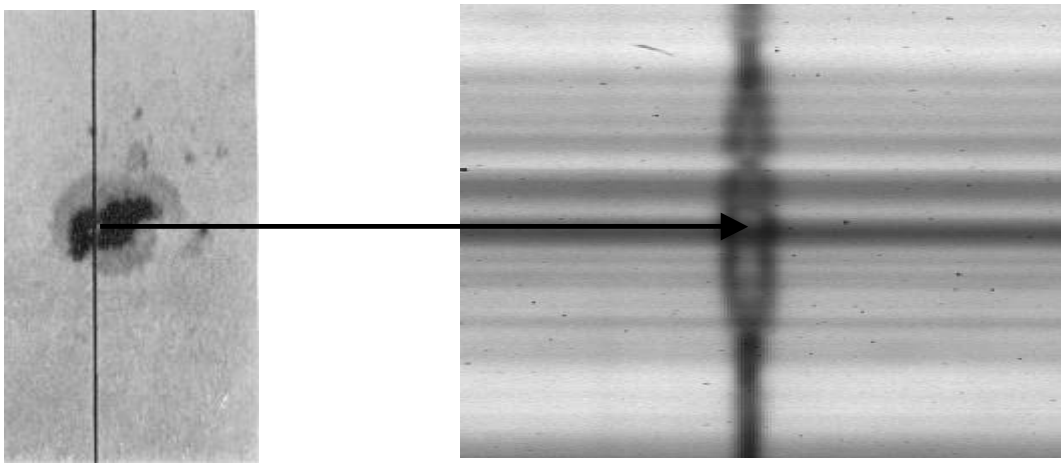


Figure 39 : Spectre d'une tache solaire mettant en évidence l'effet Zeeman qui se traduit par le dédoublement des raies

En 1931, l'étude de la couronne solaire, gaz très ténu et chaud d'électrons et d'ions entourant le Soleil, fait un bon en avant avec l'astronome Bernard Lyot (1897-1952). Opticien de génie, il met au point à Meudon un appareil baptisé coronographe qui va permettre d'observer la couronne solaire sans avoir à attendre une éclipse totale par la Lune. La couronne étant plus d'un million de fois moins lumineuse que le disque solaire, elle était jusqu'alors inobservable en dehors des éclipses. Grâce à un montage astucieux et au choix d'optiques sélectionnées, B. Lyot réalise dans son instrument une éclipse artificielle. Spécialiste de la polarisation de la lumière, il est aussi l'inventeur du filtre monochromatique polarisant qui équipe aujourd'hui un grand nombre de télescopes solaires.

L'année suivante, en 1932, Karl Jansky (1905-1950) perçoit le rayonnement radioélectrique en provenance de la galaxie. Dix ans après, les ondes radio émises par la couronne solaire sont détectées par les radars anglais au cours de la seconde guerre mondiale. Cette découverte, qui ne sera pas divulguée immédiatement, conduira l'Observatoire de Paris et l'Ecole Normale Supérieure à fonder la Station de Radioastronomie de Nançay en 1953, dédiée à l'étude des rayonnements radioélectriques célestes (figure 41).

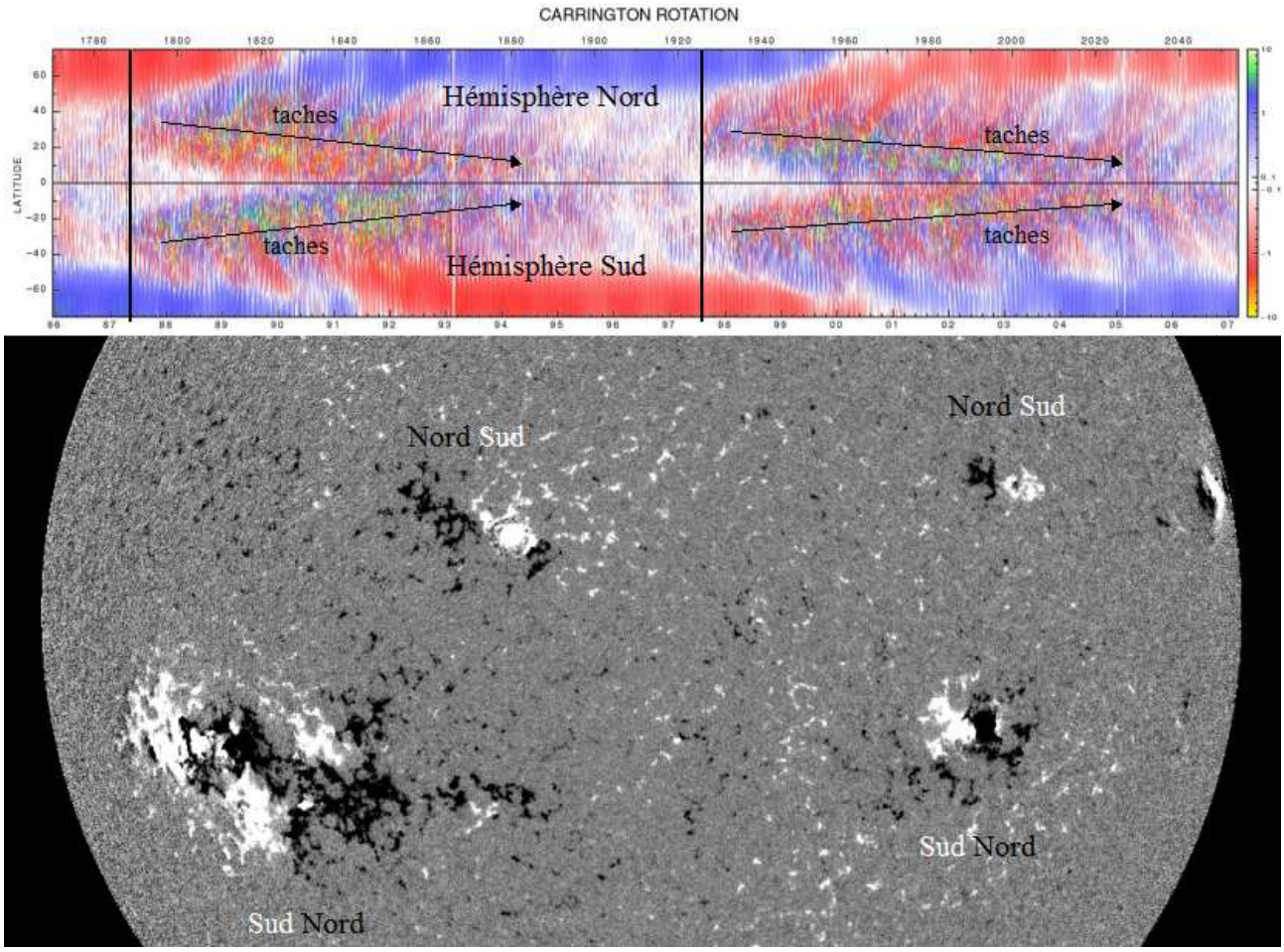


Figure 40 : Cycle magnétique solaire de 22 ans : en haut carte synoptique du Mont Wilson de 1986 à 2007 montrant la distribution des polarités magnétiques Nord et Sud (rouge et bleu) en fonction du temps (croissant de gauche à droite) et de la latitude. Le champ magnétique s'inverse tous les 11 ans. En bas, magnétogramme de SOHO/MDI montrant la différence de polarités entre les taches des régions actives des deux hémisphères (en noir et blanc polarités Nord et Sud).

Figure 41 : Le Radiohéliographe de Nançay est un interféromètre à antennes multiples qui fournit aux chercheurs des images du Soleil en ondes radio métriques (document Obs. Paris). Chaque ligne de base mesure de l'ordre du kilomètre et porte plus de 20 antennes.

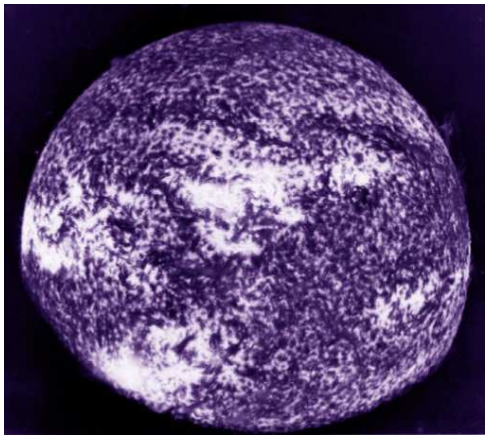
VII - Seconde moitié au XX^{ème} siècle : l'ère spatiale

C'est le lancement de Spoutnik par les Russes en 1957 qui inaugure l'ère spatiale, dont l'importance n'a cessé de croître en Astronomie depuis cinquante ans. L'intérêt de l'astronomie spatiale est de permettre l'accès à des rayonnements qui sont absorbés par l'atmosphère de la Terre, comme l'Infra Rouge, l'Ultra Violet, les rayons X ou les rayons Gamma très énergétiques. De par son hétérogénéïté en termes de températures et densités, le Soleil émet dans tous ces rayonnements, et en particulier les phénomènes coronaux. Dès 1967, l'astronome Audouin Dollfus monte avec le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) une opération d'observation de la couronne solaire en ballon à l'altitude de 32 km. Il s'agit d'un coronographe à occultation externe qui sera installé dans une nacelle (figure 42).

Figure 42 : L'une des premières expériences spatiales françaises : ce coronographe à occultation externe (on distingue en haut du tube le disque occulteur) sera lancé d'Aire sur Adour (CNES). Document Audouin Dollfus, Obs. Paris.

A la fin des années soixante-dix, le laboratoire de Physique Stellaire et Planétaire du CNRS participe à l'expérience TRC (Transition Region Camera) qui a fourni des images extraordinaires dans la raie de l'Hydrogène Lyman alpha de la région de transition chromosphère couronne à 20000 degrés (figure 43).

En 1996, l'Agence spatiale Européenne (ESA) , en collaboration avec la NASA, a installé au point de Lagrange L1 du système Terre Soleil, à 1.5 millions de km en direction du Soleil, l'observatoire SOHO qui délivre depuis des images de la couronne en lumière blanche et en Ultra Violet à plus d'un million de degrés (figures 43 et 44). La couronne a été également explorée en rayons X par l'instrument japonais Solar A dit YOHKOH entre 1991 et 1999 (figure 45).



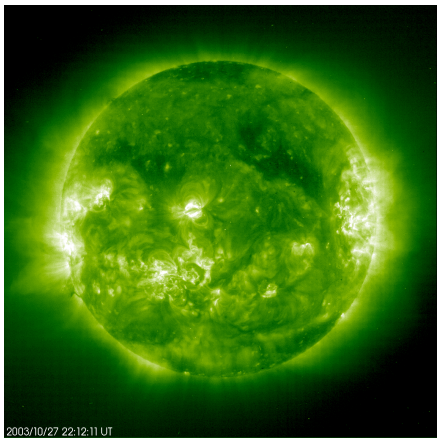
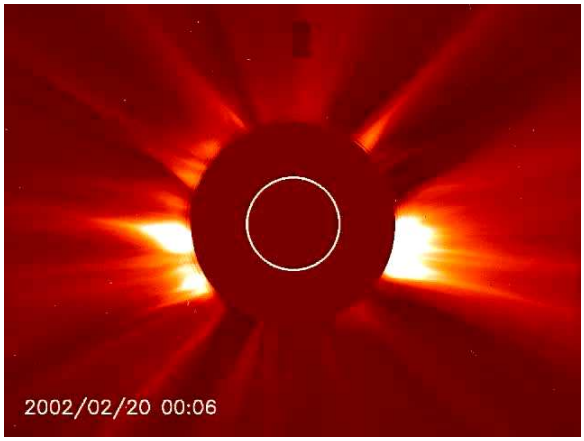


Figure 43 : Images de la zone de transition chromosphère couronne (TRC à gauche) et de la basse couronne (SOHO/EIT en Ultra Violet dans une raie du fer hautement ionisé à droite)



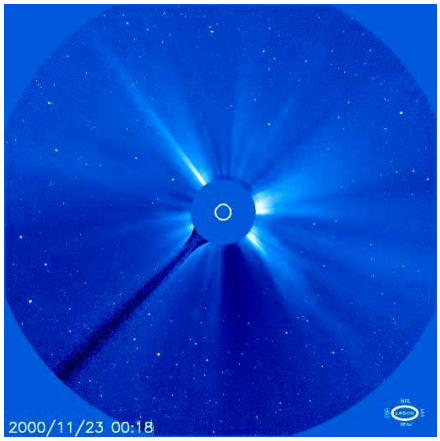
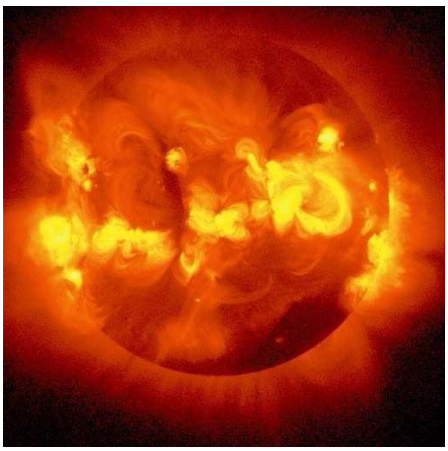


Figure 44 : Images de la couronne en lumière blanche par les coronographes de SOHO/LASCO qui ont révélé une fréquence inattendue des éjections de masse coronale dans le milieu interplanétaire (le disque solaire, caché par un occulteur, est représenté par le cercle blanc)



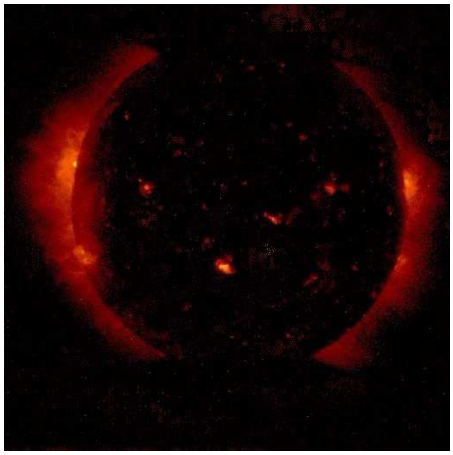


Figure 45 : Images de la couronne en rayons X au maximum et au minimum du cycle solaire (Solar A YOHKOH)

Le télescope américain TRACE (Transition Region And Coronal Explorer), placé en orbite en 1999, nous a apporté une fantastique moisson d'images des champs magnétiques solaires (figure 46) et de leurs évolutions donnant naissance aux éruptions (figure 47), éjections de masse coronale et instabilités des protubérances et filaments (protubérances vues en absorption sur le disque).

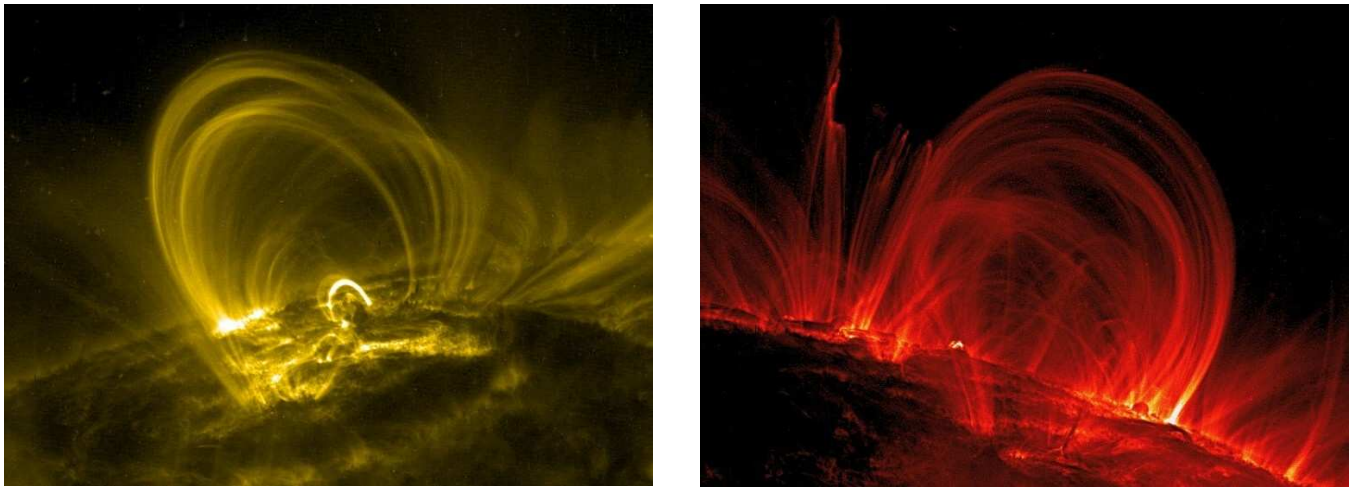


Figure 46 : Imagerie Ultra Violette des boucles de champ magnétique solaire en dans la couronne solaire (TRACE /NASA). Ces grandes boucles de 100000 km surmontent des régions actives de polarités magnétiques opposées, composées de taches ou de facules, dans lesquelles les champs sont intenses (0.1 Tesla).

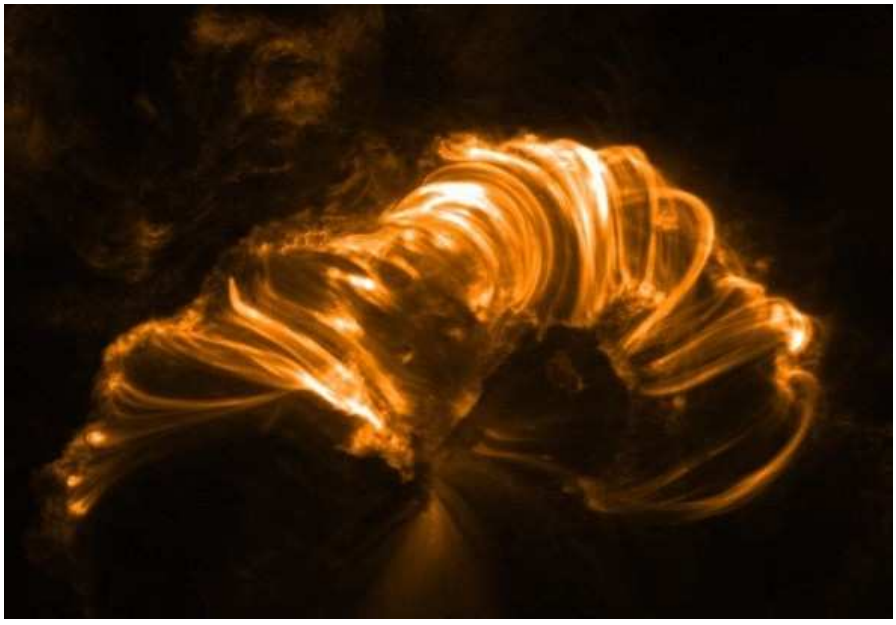


Figure 47 : Eruption solaire, phénomène hautement dynamique, en Ultra Violet (TRACE/NASA). Les boucles ou arcades magnétiques coronales surmontant des régions de polarités magnétiques opposées peuvent devenir instables ; dans ce cas, la reconfiguration magnétique par reconnexion qui s'ensuit peut libérer une grande quantité d'énergie dans le milieu interplanétaire ; parfois les particules associées atteignent la Terre et provoquent une recrudescence des aurores boréales.

En 2006, le plus gros instrument solaire spatial jamais lancé a rejoint l'orbite terrestre, il s'agit de Solar B, dit HINODE, conçu entre japonais et américains. Il donne des images du Soleil avec un pouvoir séparateur qui peut atteindre 0.2 secondes de degré (soit des détails de 150 km sur le Soleil) sans être gêné par la turbulence de l'atmosphère de la Terre qui brouille les images. Il envoie au sol par télémétrie des observations inégalées en termes de finesse sur les champs magnétiques (figure 48) et structures de la surface solaire. Son grand frère, Solar C est en projet pour la fin de la décennie (2020), et devrait repousser toujours plus loin les frontières de l'imagerie et de la spectroscopie à très haute résolution spatiale.

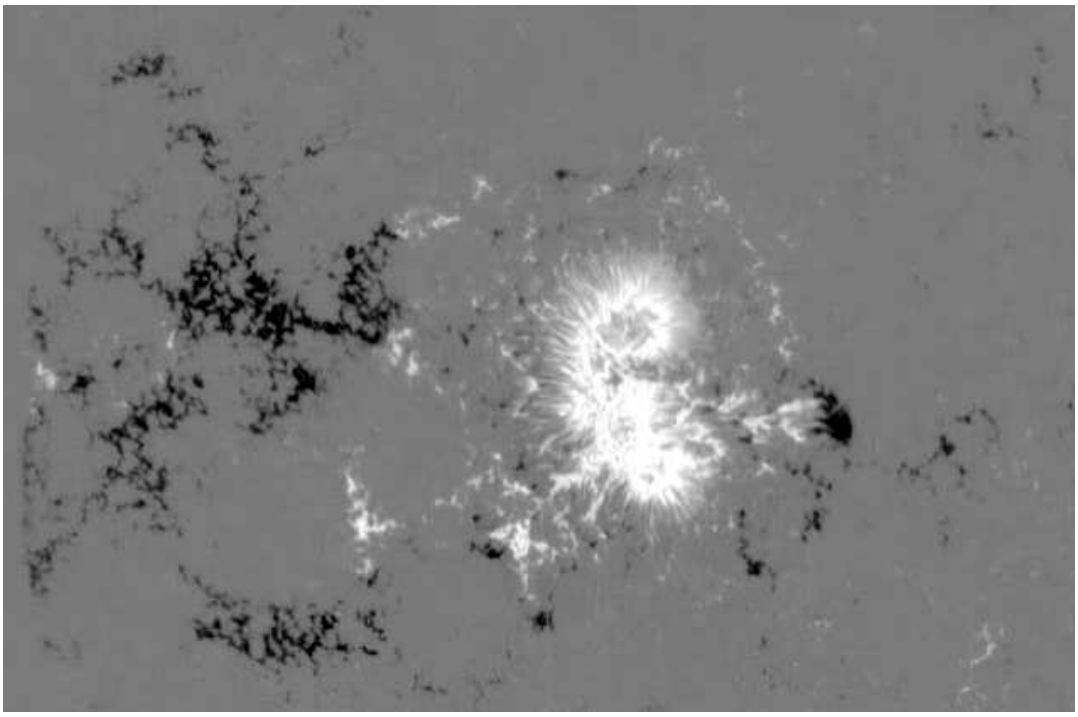


Figure 48 : Champs magnétiques des taches et facules solaires à haute résolution spatiale, instrument HINODE Solar B (JAXA /NASA), en noir et blanc les polarités magnétiques Nord et Sud

Un grand pas a également été franchi en 2006 : pour avoir une vision tridimensionnelle de l'atmosphère solaire et en particulier du développement des éjections de masse coronale, la NASA a mis en orbite autour du Soleil, au niveau de l'orbite terrestre, deux sondes jumelles, baptisées STEREO, l'une en avant de la Terre, l'autre en arrière. Ces deux sondes s'écartent progressivement l'une de l'autre, permettant de mener des observations sous deux angles de vue différents, autorisant ainsi une reconstruction géométrique en 3D des instabilités solaires. Dans le futur, d'autres explorations toujours plus innovantes seront tentées. A la fin de cette décennie, Solar Orbiter, sonde européenne, entamera un rapprochement du Soleil à seulement 0.3 fois la distance Soleil Terre. L'engin américain Solar Probe, en projet, pourrait même plonger dans l'atmosphère solaire vers 2020 !

VIII - De la lunette de Galilée au satellite PICARD : quatre siècles d'observations solaires !

Le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) lancera au cours du premier semestre 2010 le microsatellite PICARD, dont le nom est un hommage à l'abbé Jean Picard qui fut l'instigateur au XVII^{ème} siècle des mesures du diamètre solaire. PICARD va s'attaquer avec une précision jamais vue jusqu'ici (moins d'un centième de seconde de degré) aux variations du rayon solaire dans la montée du cycle numéro 24, de 2010 à 2013, soit du minimum actuel au prochain maximum solaire. PICARD va rechercher des corrélations entre l'activité solaire, les mesures d'irradiance totale ou spectrale dans plusieurs canaux de longueur d'onde, et les fluctuations du rayon de l'étoile, mobilisant une batterie de trois instruments embarqués. Outre la physique solaire, les enjeux sont d'ordre climatique. Nous avons vu que les séries de données anciennes révèlent des anomalies d'activité solaire, pouvant avoir des conséquences sur le climat. Les variations d'irradiance solaire sont-elles reliées aux variations soupçonnées du diamètre solaire ? La précision des mesures est un point critique qui impose le recours à l'observations spatiale, tant l'atmosphère terrestre constitue une gêne. La mission PICARD devrait ainsi permettre aux physiciens de mieux cerner le rôle (probablement faible) des fluctuations solaires dans les changements climatiques en cours.

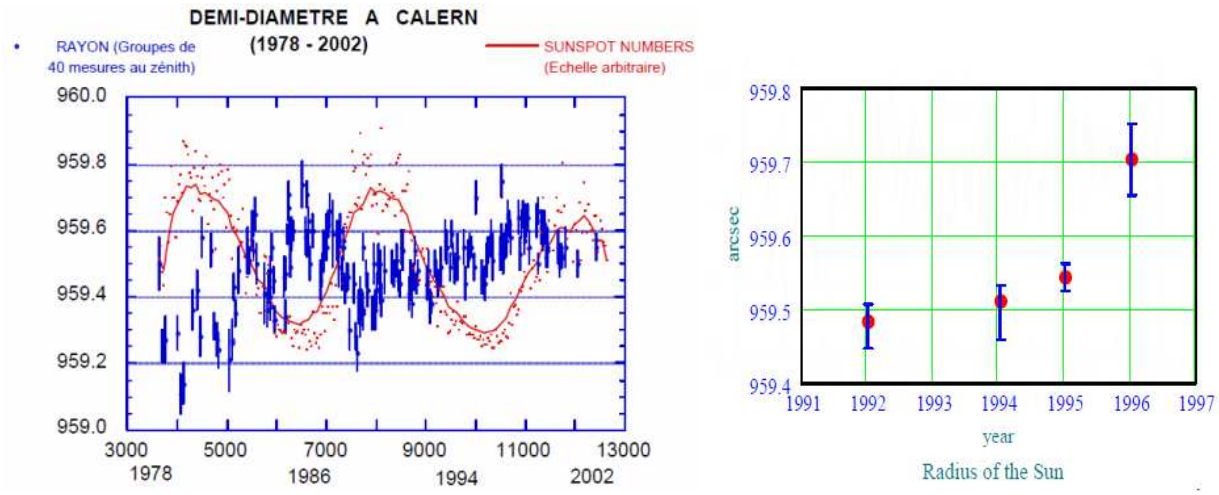
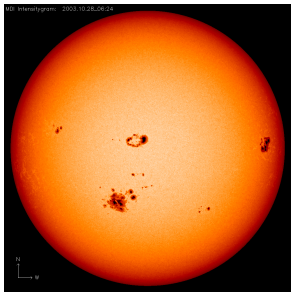
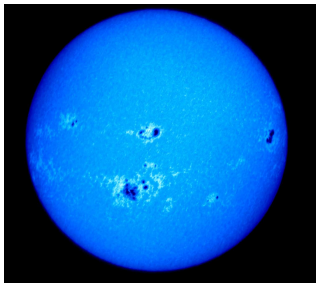


Figure 49 : Les fluctuations du rayon solaire (à gauche) pourraient être en anti corrélation avec l'activité solaire, comment le suggèrent les mesures de l'Observatoire de la Côte d'Azur au plateau de Calern. Cette hypothèse, controversée, trouve écho dans les mesures faites à partir d'un ballon stratosphérique (le Solar Disk Sextant, à droite) à 40 km d'altitude par l'équipe de l'Université de Yale (Documents G. Thuillier, LATMOS, CNRS, S. Sofia et al, Yale University).

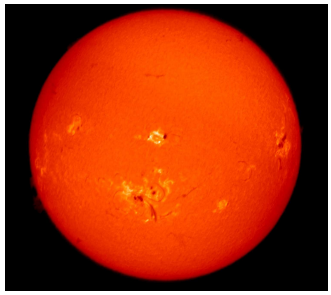
Pour finir, nous montrons en figure 50 un ensemble d'images modernes en fausses couleurs montrant les différents aspects pris par le Soleil au même moment (toutes ces observations ont été recueillies le 28 Octobre 2003), en radio, visible et en Ultra Violet, au sol et dans l'espace.

Figure 50 : Aspects multi longueur d'onde et multi instruments du Soleil observé le 28 Octobre 2003 (fausses couleurs)



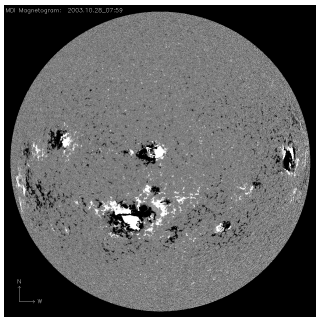


Photosphère en NiI et CaII

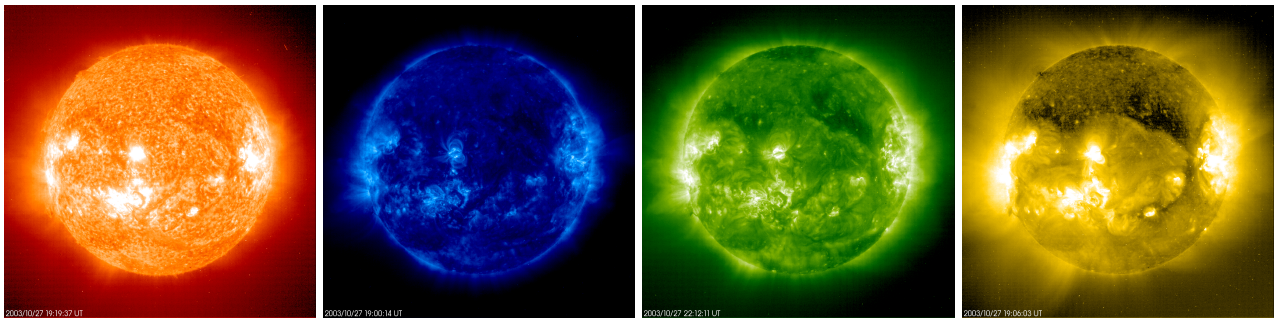


Chromosphère en Hα

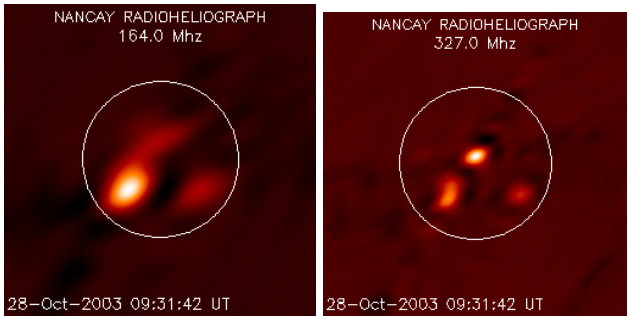
Les raies spectrales d'absorption du spectre de la lumière visible révèlent les basses couches de l'atmosphère dont la température varie entre 4500 et 8000 degrés, la photosphère et la chromosphère (Observatoire de Meudon et instrument MDI/SOHO)



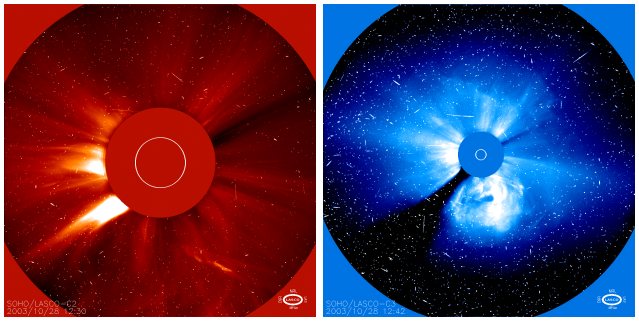
L'effet Zeeman sur les raies spectrales permet de mesurer les champs magnétiques dans la photosphère du soleil, qui sont à l'origine de l'activité de l'étoile (raie NiI, MDI/SOHO)



En UltraViolet, domaine réservé aux instruments en orbite, la basse couronne apparaît dans des températures qui vont de 80 000 à plus de 2 millions de degrés (instrument EIT/SOHO)



En ondes radioélectriques, on détecte le rayonnement des particules accélérées dans la couronne solaire (Radiohéliographe de Nançay, ondes métriques)



Les coronographes de SOHO, en lumière blanche, révèlent la couronne solaire à moyenne et grande distance (instrument LASCO/SOHO). Le disque du soleil est représenté par le cercle blanc et masqué par une « Lune artificielle ».