

Quel héritage le XVII^{ème} siècle nous a-t-il laissé en physique du Soleil ?

Notes de Jean-Marie Malherbe, Observatoire de Paris, 12/2008

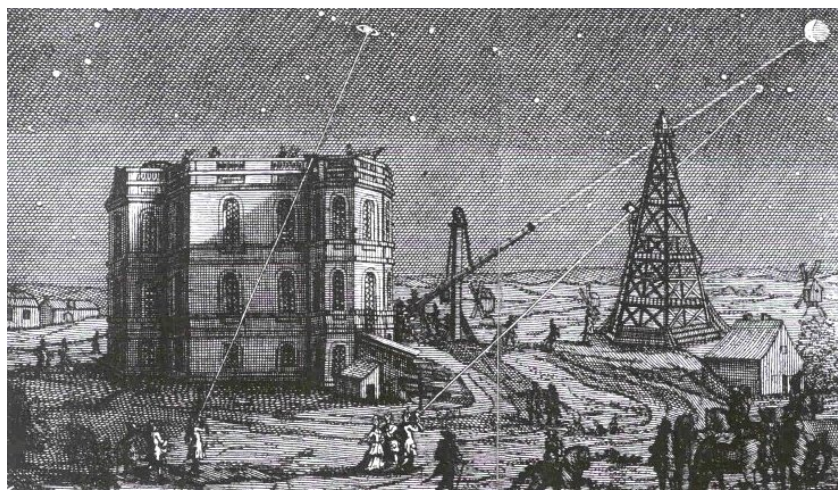
Le XVII^{ème} siècle est d'importance pour la physique solaire : c'est au début de ce siècle que les observations du Soleil ont commencé avec l'invention de la lunette astronomique, il y a 400 ans. On a découvert les taches, leur mouvement apparent, leur répartition sur le disque, la rotation solaire ; 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 2009, par ailleurs année mondiale de l'astronomie, 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.



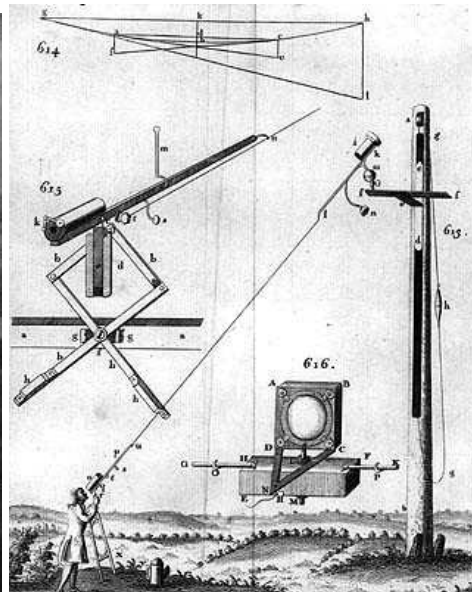
*Colbert présente
l'Académie au Roi. Dans
le fond, l'Observatoire
Royal.
Peinture d'Henri Testelin.
Huile sur toile. Château
de Versailles.*

*Le Roi en visite à l'Académie
des sciences (1671). Dans le
fond, on aperçoit
l'Observatoire Royal.
Gravure de Sébastien Le
Clerc.*





Jean-Dominique Cassini (1625-1712) fut invité, sur recommandation de Picard, par Colbert à la tête de l'Observatoire. Les lunettes à courte focale étaient suspendues à des mâts. Les lunettes aériennes à longue focale vers 1685 étaient construites selon les principes énoncés par Huyghens (1629-1695). Les objectifs étaient fixés soit sur le bâtiment Perrault, soit sur la Tour de Marly, en bois, provenant du système hydraulique (machine de Marly) d'alimentation des eaux de Versailles.

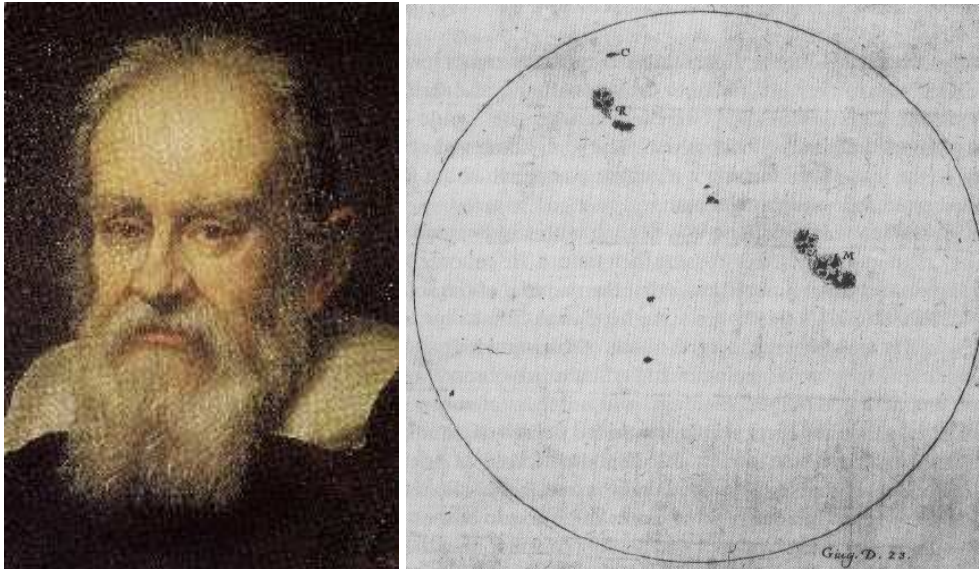


Christian Huyghens (1629-1695), savant hollandais, l'un des premiers membres de l'Académie des sciences, énonce les principes de la lunette aérienne à longue focale

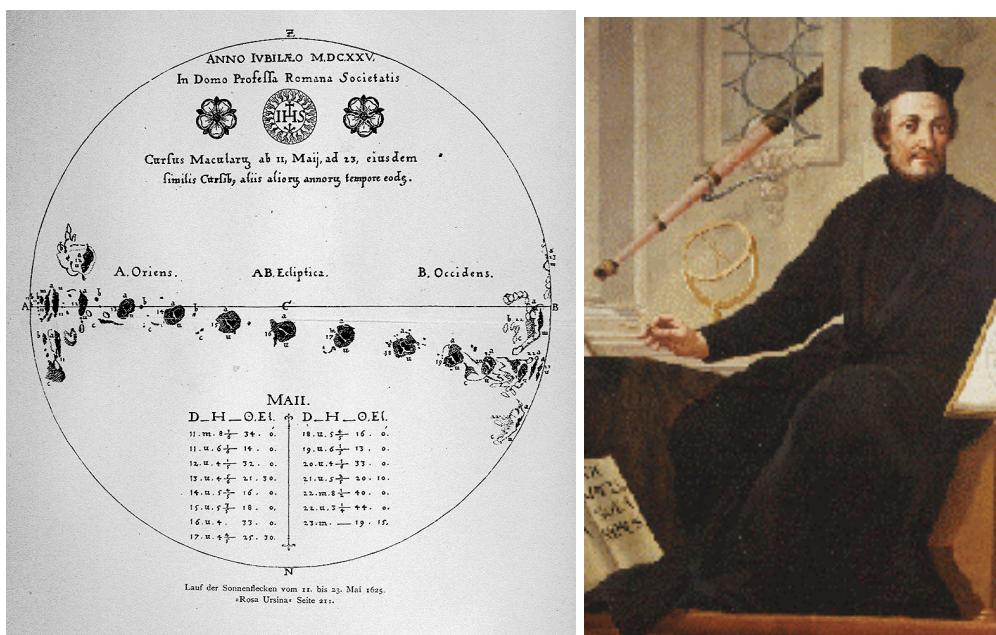
1610: Premières observations des taches solaires à la lunette

Au tout début du XVII^{ème} siècle, quatre astronomes eurent l'idée d'observer le Soleil à l'aide de la lunette astronomique, et découvrirent l'existence des taches solaires. Il s'agit de Johannes Fabricius (1587-1616) en Hollande, Thomas Harriot (1560-1621) en Angleterre, Galilée (1564-1642) en Italie, et le Jésuite Christoph Scheiner (1575-1650) en Allemagne. Harriot a effectué la première observation à la lunette des taches solaires, en Décembre 1610. Fabricius fut le premier à comprendre que le mouvement des taches solaires d'un jour à l'autre (décalage de 13° vers l'Ouest en coordonnées héliographiques) était dû à la rotation du Soleil sur lui même. Néanmoins, ce sont

Galilée et Scheiner (ouvrage Rosa Ursina, 1630, numérisé et en ligne à Florence au musée des sciences (<http://fermi.imss.fi.it/rd/bdv?/bdviewer/bid=367767>) 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 (comme Mercure et Vénus) passant entre le Soleil et la Terre.



Galilée et l'un des premiers dessins du soleil représentant l'ombre et la pénombre des taches (1612).



Le jésuite Christoph Scheiner(1575-1650) est l'un des premiers observateurs à observer régulièrement les taches (ci dessus dessin de 1625).

Le cycle d'activité solaire de 11 ans, caractérisé par une variation cyclique du nombre de taches solaires présentes sur la surface du Soleil, ne sera découvert que bien plus tard, au début du XIX^{ème} siècle, par l'astronome allemand Heinrich Schwabe (1789-1875). L'identification du cycle magnétique associé de 22 ans est encore plus récente : elle est dûe à l'astronome américain George

Hale (1868-1938). Un peu plus tard, Wolfgang Gleissberg (1903-1986) découvrira 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.

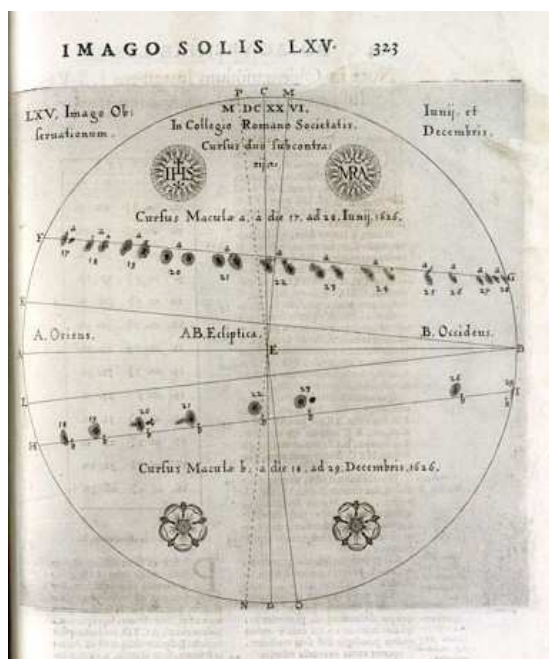


Christoph Scheiner (1575-1650) aurait utilisé l'une des premières lunettes en monture équatoriale, qui serait apparue vers 1616, comme le montre ce croquis issu de Rosa Ursina, 1630. L'observation se faisait par projection sur un carton. L'instrument est appelé « télescope héliotrope ».



L'inclinaison de l'axe de rotation du soleil sur l'écliptique

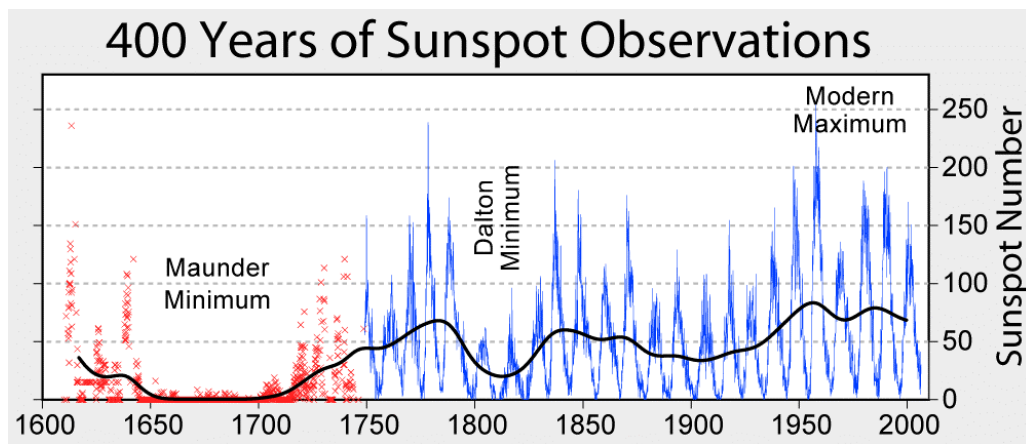
En combinant des observations effectuées à 6 mois d'intervalle, Scheiner découvrit que l'axe de rotation du soleil n'est pas orthogonal au plan de l'écliptique, mais est incliné d'environ 7°.



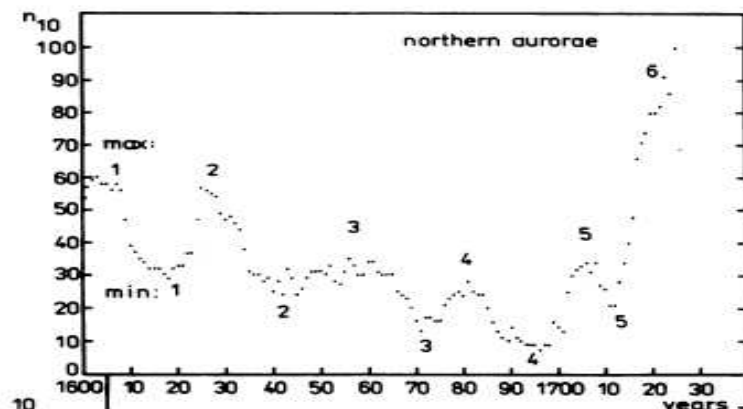
Trajectoires apparentes sur le disque solaire de deux grandes taches observées à six mois d'intervalle, Juin et Décembre 1626, mettant en évidence l'inclinaison du Soleil sur le plan de l'écliptique (extrait de Rosa Ursina).

1645-1705: 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. Cependant, très peu de taches furent observées entre 1645 et 1705, époque où l'apparition d'une tache était souvent notée comme un "événement" 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.



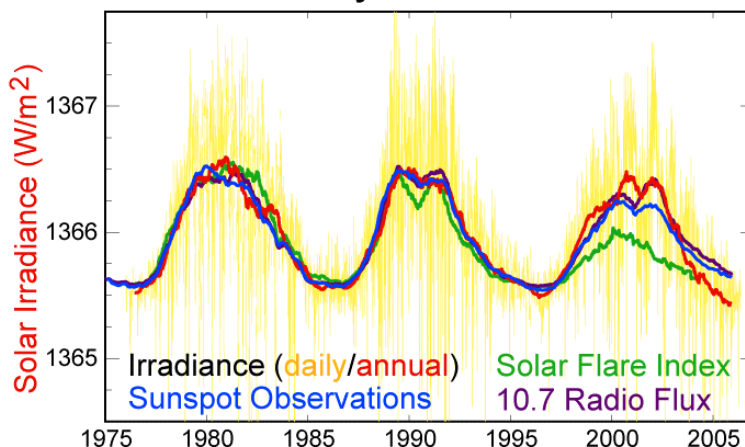
Cette période d'activité solaire réduite est connue sous le nom de Minimum de Maunder, en honneur de l'astronome anglais Edward Maunder (1851-1928). Maunder étendit les études historiques entreprises par l'allemand Gustav Spörer (1822-1895), qui laissa lui-même son nom au minimum de Spörer présumé entre 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 (le "petit âge glaciaire" en climatologie, de 1550 à 1850 environ) : il est possible qu'il y ait une corrélation avec le niveau anormal de l'activité solaire, bien que cette supposition soit aujourd'hui très controversée.



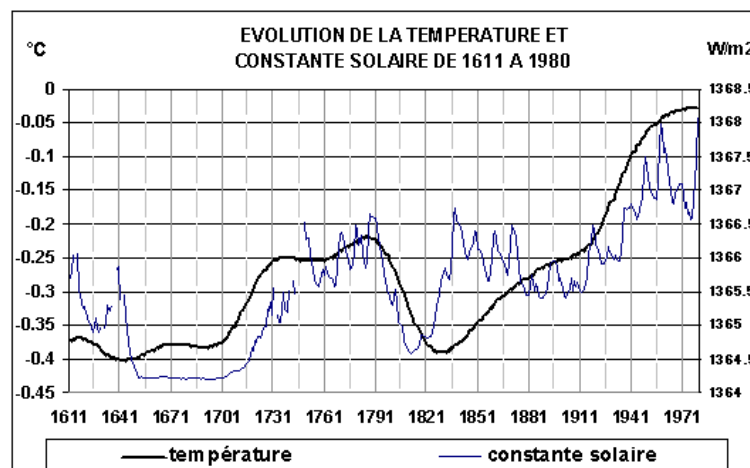
Observations des aurores boréales au XVII^{ème} siècle selon la reconstruction de Krivsky, 1986. la fréquence des aurores boréales est liée à l'activité solaire. Il y a un creux entre 1650 et 1700, bien corrélé au déficit de taches sur le Soleil.

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 ci dessus. Les fluctuations de température pourraient être liées aux variations de l'irradiance solaire ou flux moyen d'énergie reçue par la Terre (voisin de 1365 W/m²). La reconstitution approximative de l'irradiance (non observée à l'époque) et de l'activité solaire ancienne (plus de 400 ans) passe par l'utilisation de « proxies » comme la concentration des isotopes cosmogéniques, dans la mesure où l'on a noté une bonne corrélation entre leur concentration et l'activité solaire d'une part, ainsi qu'entre les mesures modernes d'irradiance et le nombre de taches d'autre part.

Solar Cycle Variations



Mesures contemporaines de l'irradiance solaire totale (en jaune et rouge) depuis 1975, montrant une bonne corrélation avec l'observation du nombre de taches (en bleu): en période d'activité solaire intense, le Soleil est plus brillant.

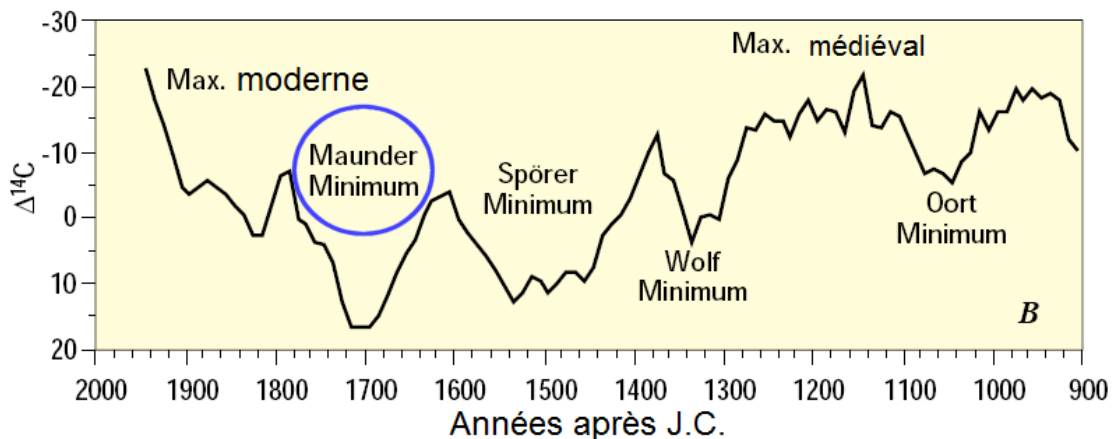


Température (trait noir) et reconstruction de l'irradiance solaire ou puissance reçue par la Terre en W/m² (trait bleu), marquant un déficit d'irradiance aux minima de Maunder et Dalton.

Néanmoins, le nombre de taches était resté relativement élevé, ainsi que l'activité aurorale, dans certaines périodes froides du petit âge glaciaire (avant 1650, comme le montre la figure ci dessus). Pour cette raison, les données historiques très précieuses du XVII^{ème} 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.

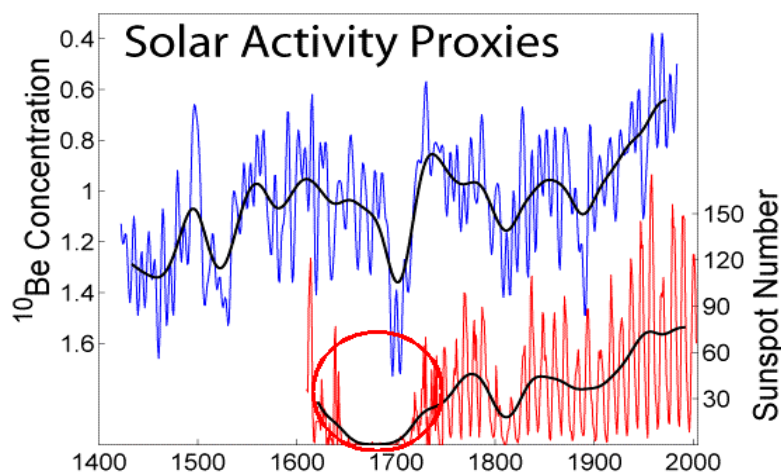
Avant l'observation des taches, la reconstruction de l'activité solaire est donc basée sur des « proxies » dont nous donnons quelques détails. Parmi ces « proxies », on trouve :

- l'isotope Carbone 14 (^{14}C) 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 $^0_1\text{n} + ^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{14}_6\text{C} + ^0_1\text{H}$. La proportion de ^{14}C au carbone total 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 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 jusqu'à 10000 ans derrière notre ère avec cet isotope.

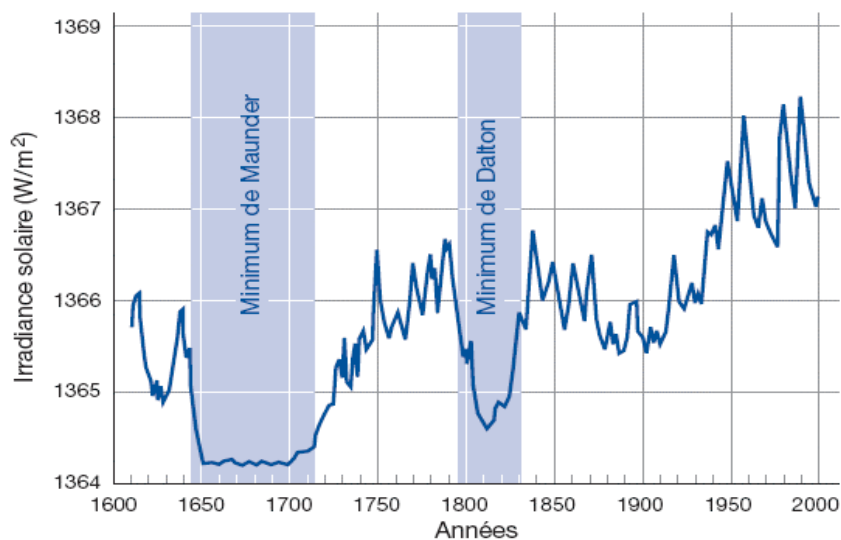


L'activité solaire reconstituée à partir de la variation de concentration en ^{14}C

- L'isotope Beryllium 10 (^{10}Be) est également un isotope cosmogénique (demi vie de 1.3 million d'années) créé dans la haute atmosphère (8-15 km) 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, 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 ci dessous) 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 ^{14}C , marquant une activité solaire très réduite.



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.



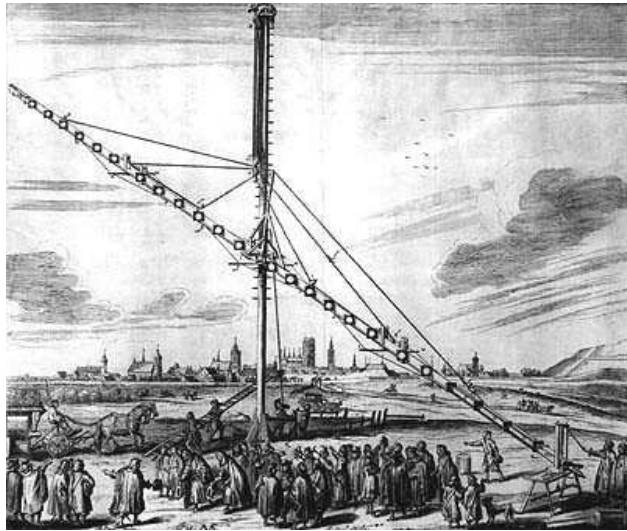
Reconstruction de l'irradiance solaire en W/m². L'irradiance est plus élevée lors des maxima d'activité solaire ; une explication possible serait liée à la surface couverte par les facules brillantes, zones chaudes entourant les taches froides et dont la surface est bien plus importante que celle des taches (d'après Lean et al, 1995, et Vonmoos, EAWAG news). L'irradiance solaire aurait été plus faible au minimum de Maunder (d'où un rapprochement possible mais incertain avec le refroidissement du petit âge glaciaire)

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

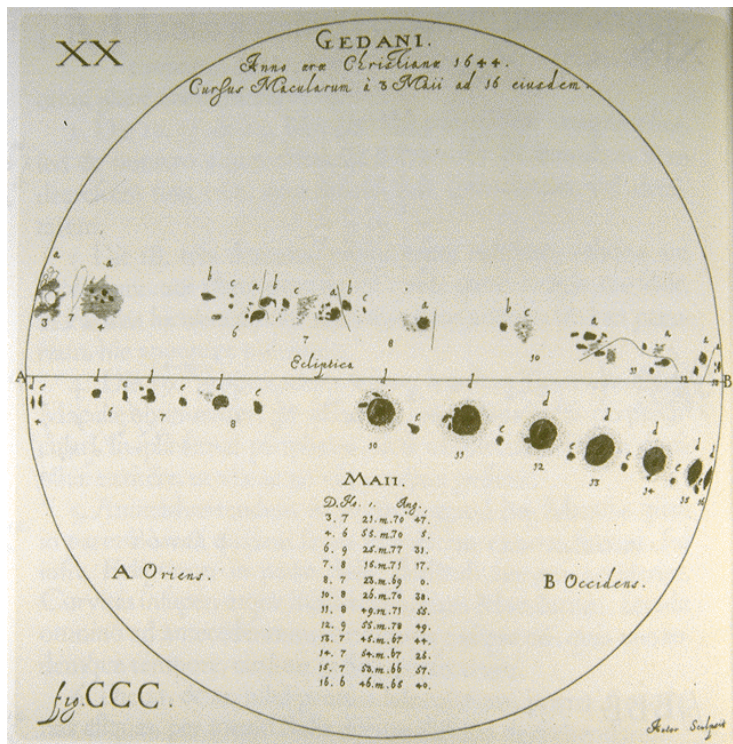
Les fluctuations de la rotation solaire (moyenne et différentielle selon la latitude) ont été examinées récemment par différents auteurs à partir d'observations réalisées à deux époques dans la première moitié du XVII^{ème} siècle ; de 1625 à 1626 (observations de Scheiner dans Rosa Ursina) et de 1642 à 1644 (observations d'Hevelius dans Selenographia en ligne aux USA à l'adresse suivante : http://posner.library.cmu.edu/Posner/books/book.cgi?call=520_H59S_1647). 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 aux hautes latitudes plus hautes) aurait pu être nettement plus accentuée, suggérant une accélération équatoriale au moment où 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.

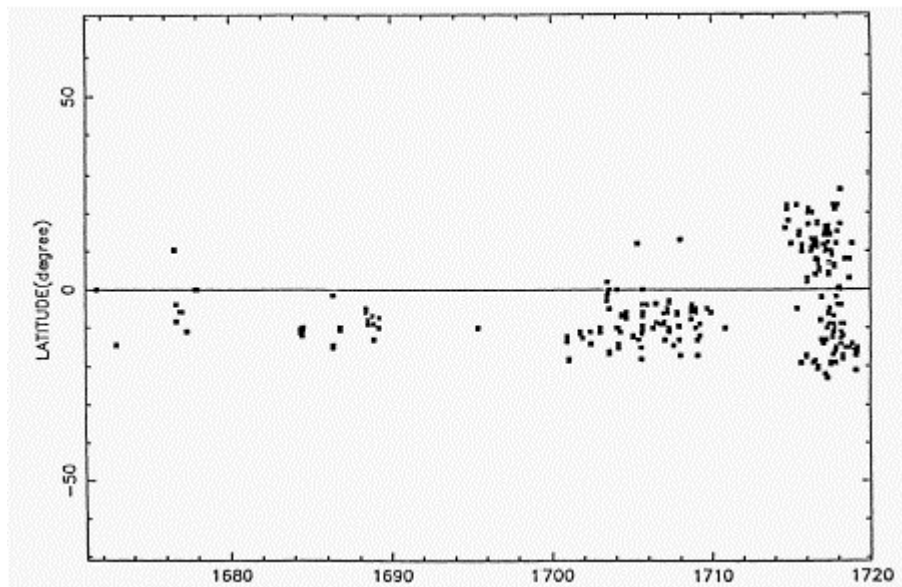


Hevelius (1611-1687) et ses « machinae coelestis » de 45 m de distance focale
http://posner.library.cmu.edu/Posner/books/book.cgi?call=520_H59M_1673_VOL._1

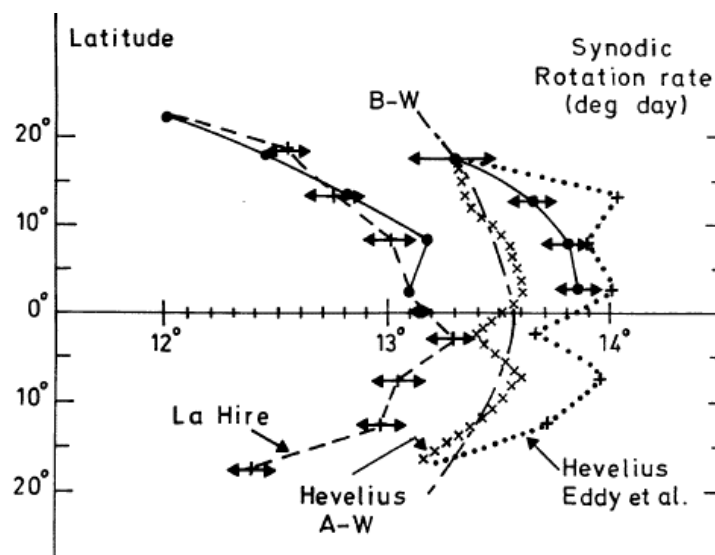


Hevelius a consigné ses observations des taches solaires (ici en 1644) dans son ouvrage sur la Lune *Selenographia*

Ribes et al (1993) ont étudié les données obtenues par Picard, puis par 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. 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 $\pm 40^\circ$ 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.



Position des taches en latitude au minimum de Maunder d'après 50 ans d'observations successives 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 vers 1710.



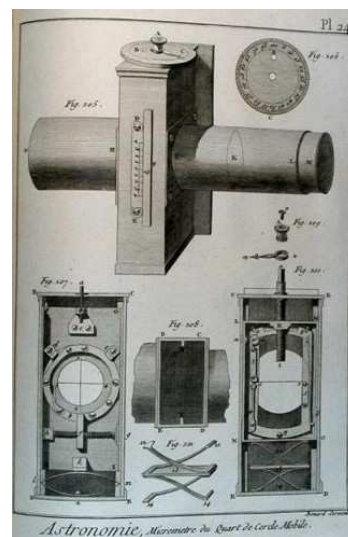
Vitesse de rotation des taches en degrés/jour au minimum de Maunder d'après les observations de Picard et La Hire (1667-1719) et de Hevelius (1642-1644). Il y a contradiction apparente, mais il s'agit d'observations décalées dans le temps. Reconstruction de Ribes et al (1988) sur les données de Picard 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. 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).

Le diamètre angulaire du soleil

La lunette de Galilée, d'abord munie d'une lentille divergente en guise d'oculaire, fut ensuite munie par Kepler d'un oculaire convergent (une loupe), qu'améliora ensuite Huyghens. Ces lunettes servaient à l'observation à l'oeil ou par projection. 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 micrométrique 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 d'arc, une véritable prouesse pour l'époque. La mesure du diamètre solaire revêt une importance considérable, car ses variations pourraient conditionner la luminosité de l'étoile.



L'abbé Jean Picard (1620-1682) en incorporant à l'oculaire de la lunette astronomique le micromètre à fil mobile d'Auzout a apporté à l'observatoire de Paris une contribution majeure à la détermination précise du diamètre solaire, et à l'astronomie de position.

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 Huyghens 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 d'arc sur la valeur du diamètre.

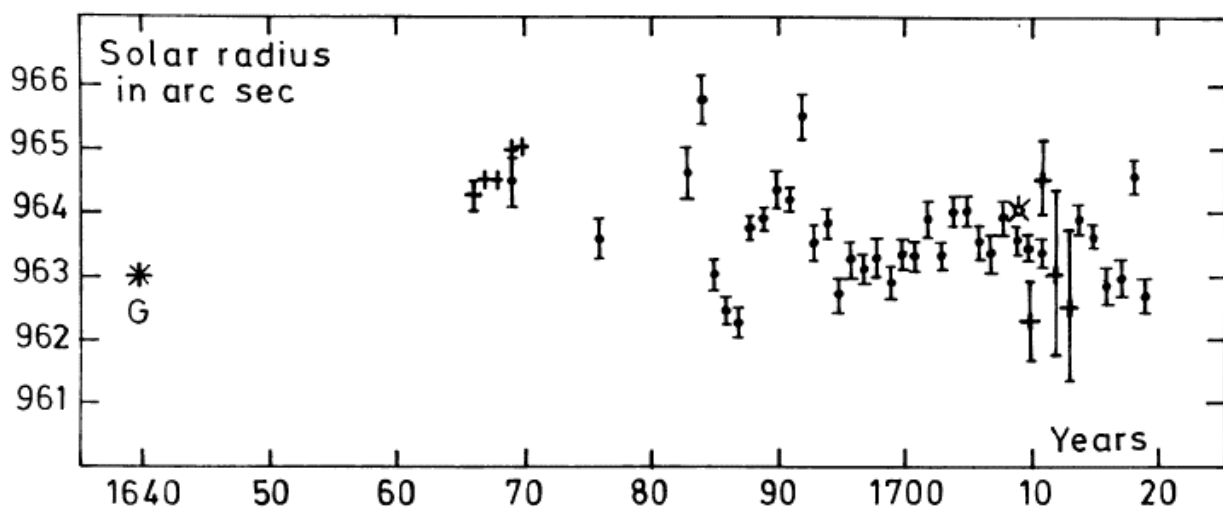
Les mesures de Picard et La Hire ont été patiemment redécouvertes et étudiées par Elizabeth Nesme-Ribes, à l'Observatoire de Paris. Il ressort de ces mesures historiques que le Soleil aurait pu présenter un diamètre supérieur de 7 secondes d'arc au minimum de Maunder par rapport aux mesures contemporaines. 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 rapide 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 déchu de 3 secondes d'arc.

Wittmann (1979) a utilisé de son côté les données plus récentes de Tobias Mayer (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 d'arc).



Philippe de la Hire (1640-1719) continue les observations du diamètre solaire de Picard, mais en mesurant les temps de transit du soleil dans son instrument, un quart de cercle méridien (celui présenté à droite, de Lalande, est postérieur de plusieurs décennies)

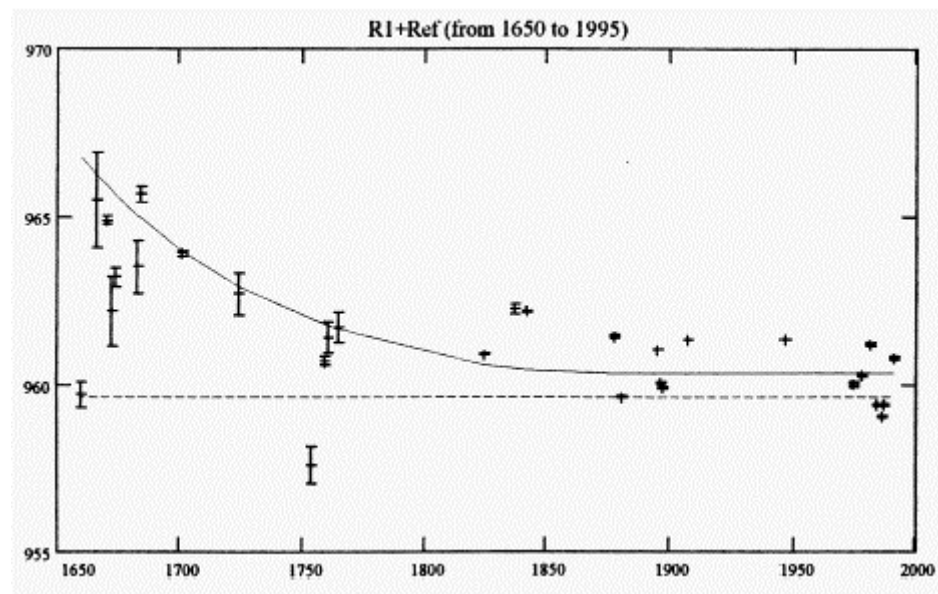


Rayon angulaire solaire au minimum de Maunder d'après les observations micrométriques (+) ou de transits (•). Le symbole ☼ réfère à une éclipse. Reconstruction de Ribes et al (1993).

Michel Toulmonde, de l'Observatoire de Paris (1997), a effectué une compilation de toutes les mesures de diamètre solaire faites depuis 1650 (hormis les mesures d'éclipses et les observations ballon du XX^{ème} siècle) et a conclu que les variations mesurées 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 définitive ne peut donc être formulée. C'est la raison pour laquelle les résultats du satellite PICARD du CNES, à partir de fin 2009, sont très attendus.

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

Observations du diamètre solaire recensées par Toulmonde (1997) : on constate que la majorité des mesures (nombre N) provient de La Hire. R est le rayon angulaire mesuré en secondes d'arc.
PP : transit projeté
MI : visée micrométrique
DP : transit observé
HE : héliomètre



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

Pour conclure, nous pouvons affirmer que le XVII^{ème} siècle nous a légué bien des énigmes et des interrogations concernant la variabilité solaire et la « machinerie » solaire : les observations régulières des taches nous interpellent 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 d'origine anthropique. De telles prédictions nous semblent incertaines (qui avait prévu, par exemple, que le minimum local de 2008 serait le plus creux depuis 50 ans ?).

Autres événements importants au XVII^{ème} siècle pour la physique du Soleil

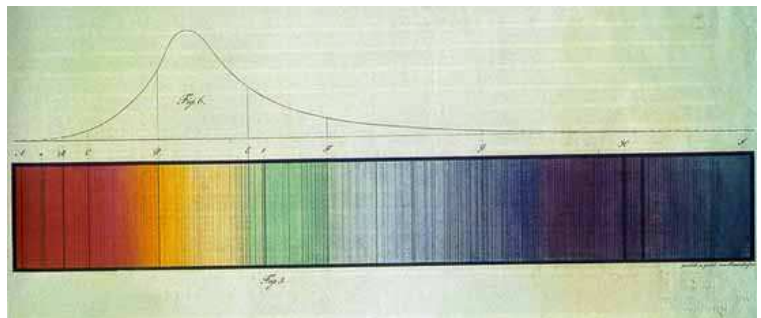
1666: Le spectre continu de la lumière solaire

Entre 1664 et 1666, le physicien anglais Isaac Newton (1642-1727) entreprit une série d'expériences sur la réfraction et la nature de la lumière blanche. Newton fit passer un faisceau de lumière solaire à travers un prisme de verre, séparant ainsi ses composantes chromatiques en faisant apparaître le spectre de la lumière solaire visible en arc en ciel. Newton a donc mis en évidence le spectre continu du Soleil. Il faudra attendre Fraunhofer, en 1817, pour discerner des raies sombres dans le spectre solaire, ou raies d'absorption qui sont la signature des éléments chimiques présents dans l'atmosphère solaire. En 1671, Newton construisit le premier télescope à deux miroirs (l'un concave et l'autre plan) dont la formule a conservé son nom.



Newton disperse la lumière solaire avec un prisme et observe le spectre continu du Soleil

Ce n'est que beaucoup plus tard que Joseph von Fraunhofer (1787-1826) découvrira dans le spectre solaire plusieurs centaines de raies d'absorption



1672 : Mesure de la distance Soleil Terre

En 1672, profitant d'une opposition de Mars (alignement Soleil, Terre, Mars), Jean Richer, de l'Observatoire de Paris, en mission à Cayenne, et Jean Dominique Cassini, resté à Paris, profitèrent du passage de Mars au plus proche de la Terre pour mesurer sa parallaxe (angle sous lequel est vue la distance Paris Cayenne depuis Mars). Ces observations simultanées leur permirent de déterminer la distance d de Mars à la Terre lors de l'opposition, puis la distance entre la Terre et le Soleil, avec une bonne approximation (130 millions de km contre 149,6 millions pour la valeur moyenne actuelle). Cette mesure dérive de la troisième loi formulée en 1618 par l'astronome allemand Johannes Kepler (1571-1630) appliquée à la rotation de la Terre et de Mars autour du Soleil (T période de révolution, a demi grand axe):

$$T_{\text{Mars}}^2/a_{\text{Mars}}^3 = T_{\text{Terre}}^2/a_{\text{Terre}}^3 = \text{constante, et } a_{\text{Mars}} = a_{\text{Terre}} + d \text{ lors de l'opposition.}$$

Le diamètre du Soleil en km s'en déduit à partir de son diamètre angulaire sur le ciel.

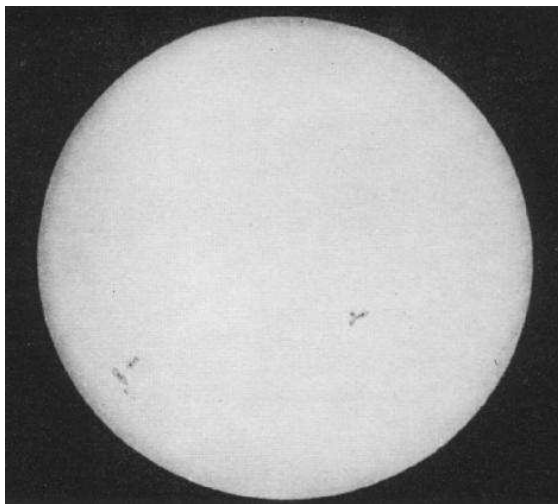
1676 : Mesure de la vitesse de la lumière

Olaus Römer (1644-1710), savant danois de Copenhague ramené à Paris par Picard, devint membre de l'Académie des Sciences. Il mesura à l'Observatoire de Paris la vitesse de la lumière grâce à la mesure des retards des éclipses des satellites de Jupiter. Il a trouvé environ 215 000 km/s ce qui correspond à 11 minutes lumière du Soleil à la Terre, résultat remarquable pour l'époque. On sait que les mesures modernes mettent la vitesse de la lumière à 300 000 km/s, c'est à dire le Soleil à 8 minutes lumière de la Terre.

1687: La masse du soleil

Isaac Newton (1642-1727) a effectué la première détermination quantitative de la masse du Soleil, à l'aide de sa loi de la gravitation universelle, dans laquelle la force d'attraction F entre deux corps de masses m et M est donnée $F = G m M / r^2$. 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, avec les lois de Newton : $T^2 / a^3 = 4 \pi^2 / GM$, où M est la masse du Soleil et G la constante d'attraction universelle.

Vers l'époque moderne : le premier daguerréotype du Soleil en 1845



Daguerréotype du Soleil réalisé à l'Observatoire de Paris par Hippolyte Fizeau (1819–1896) et Léon Foucault (1819-1868). La photographie est née et va progressivement se généraliser et remplacer le dessin.

Avec la naissance de la photographie, on se dirige vers l'époque moderne. La photographie du Soleil en lumière monochromatique, c'est à dire dans des raies spectrales, apparaîtra vers 1890 avec l'invention du spectrohéliographe par Henri Deslandres à l'Observatoire de Paris (1853-1948) et George Hale aux USA (1868-1938), qui identifia en 1908 la nature magnétique des taches.

