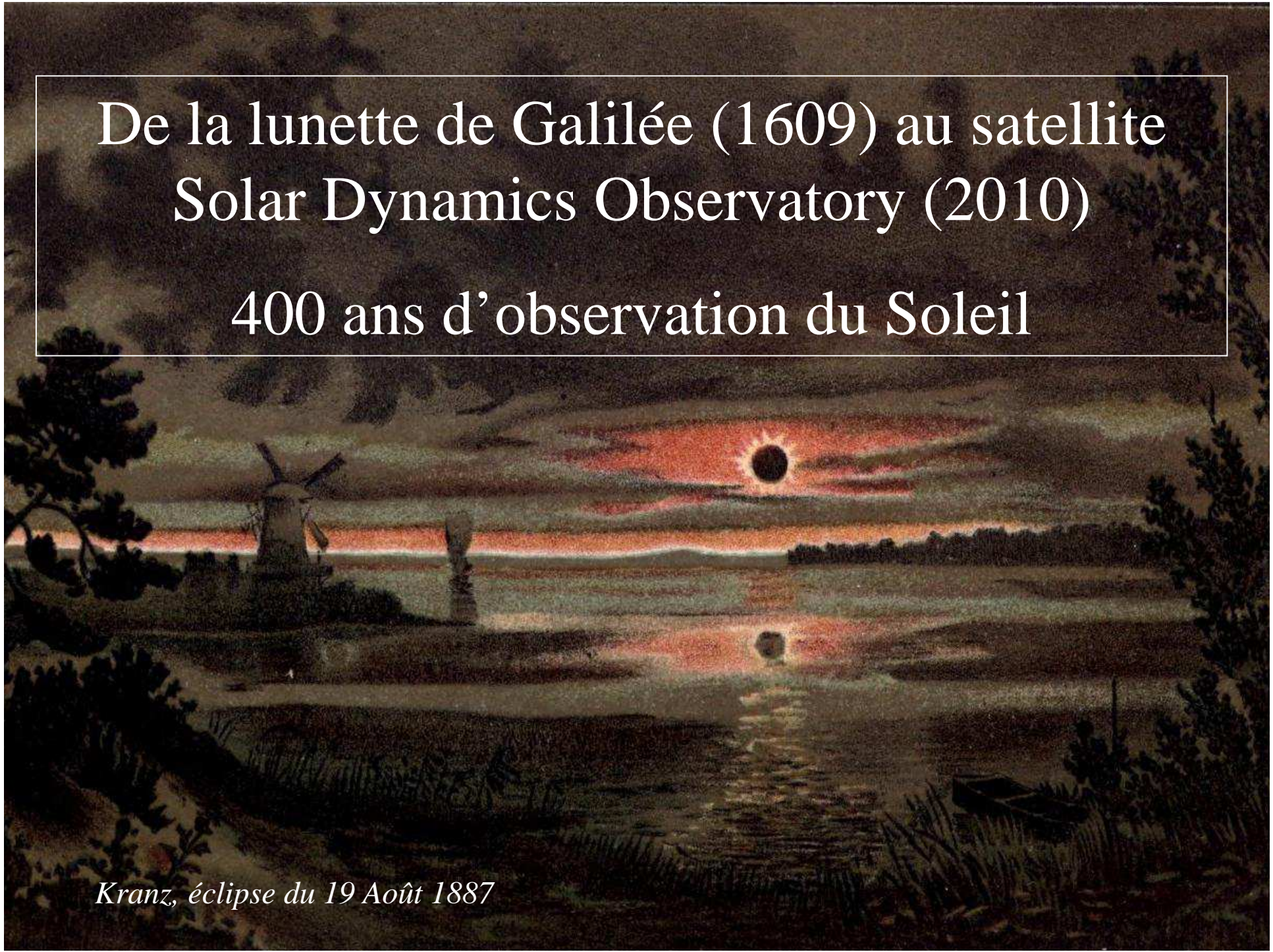


De la lunette de Galilée (1609) au satellite  
Solar Dynamics Observatory (2010)

400 ans d'observation du Soleil

*Kranz, éclipse du 19 Août 1887*







*1609: la lunette de Galilée*

*Dessins de Christoph  
Scheiner (1573-1650)  
observations 1625-1626*

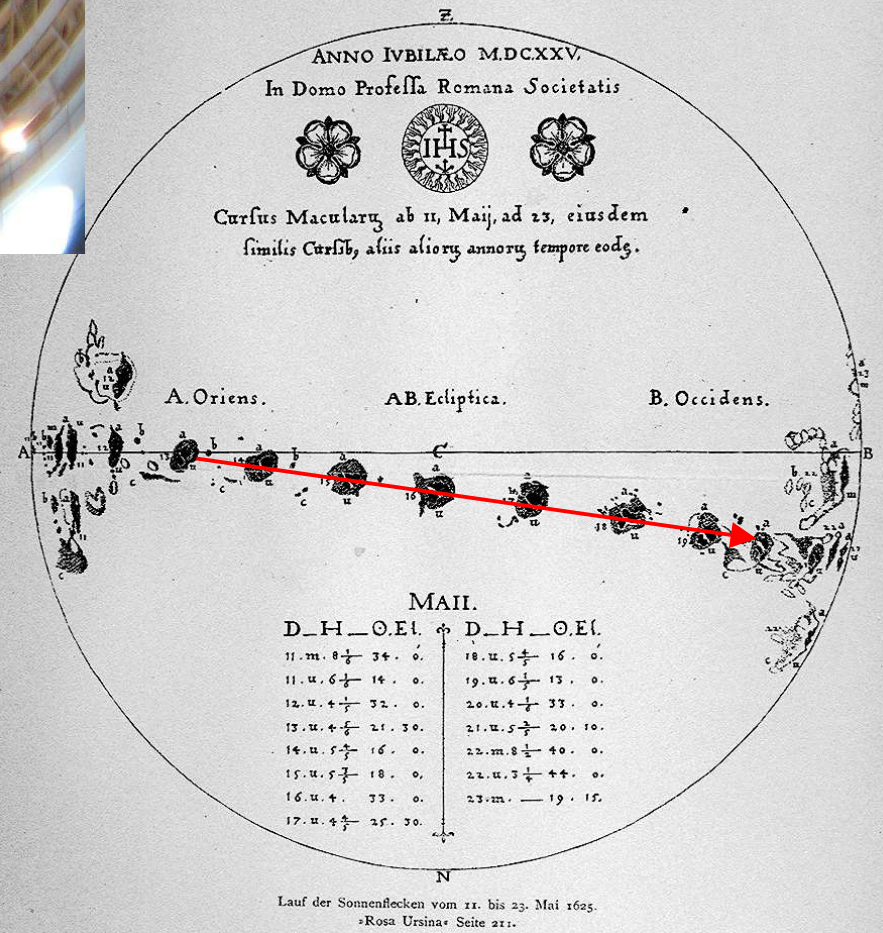
*1610: premières observations des  
taches solaires à la lunette*

*Thomas Harriot (1560-1621)*

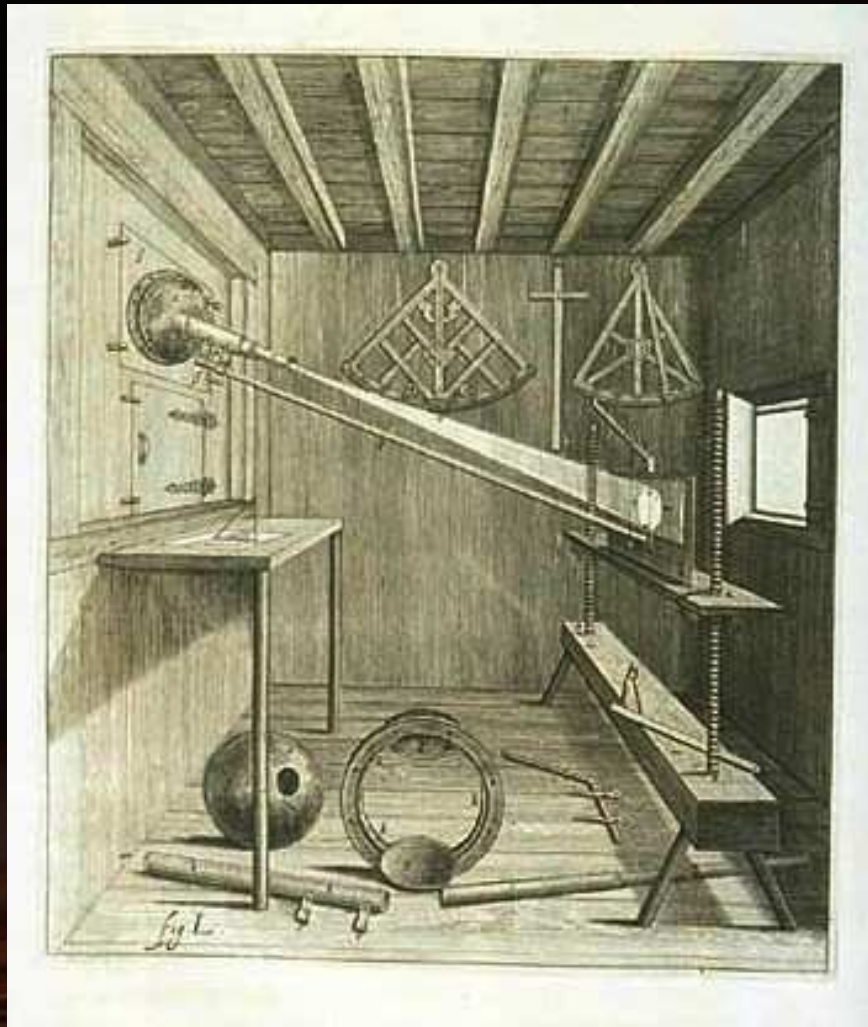
*Galileo Galilei (1564-1642)*

*Christoph Scheiner (1573-1650)*

*Fabricius (1564-1617)*

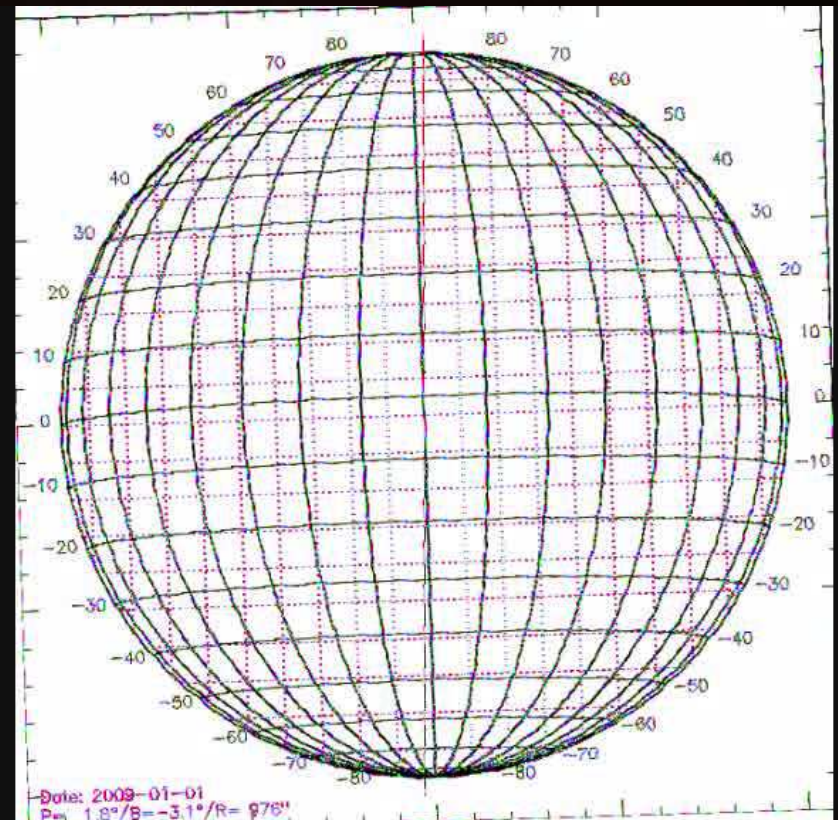




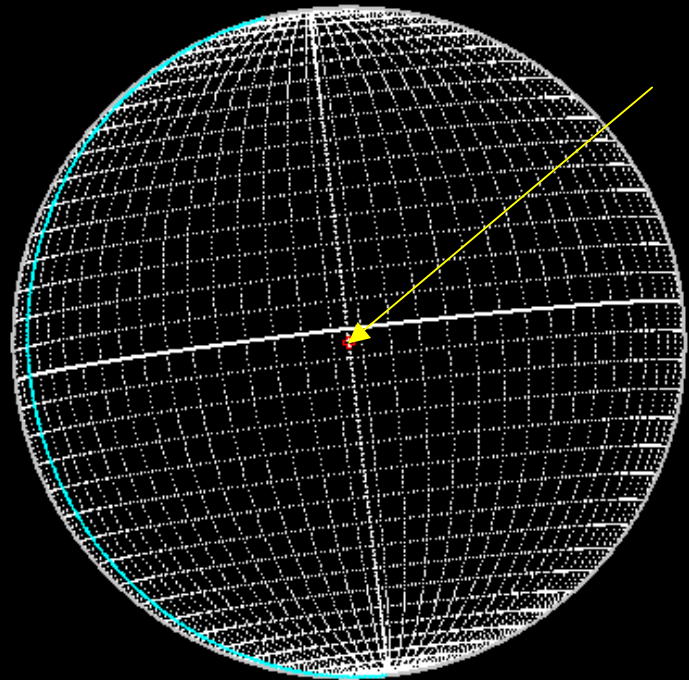
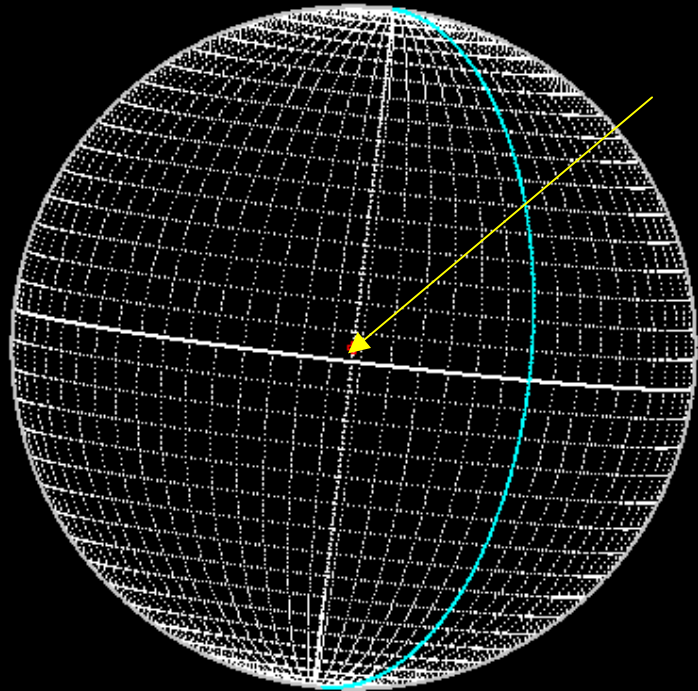


*Observation par projection*

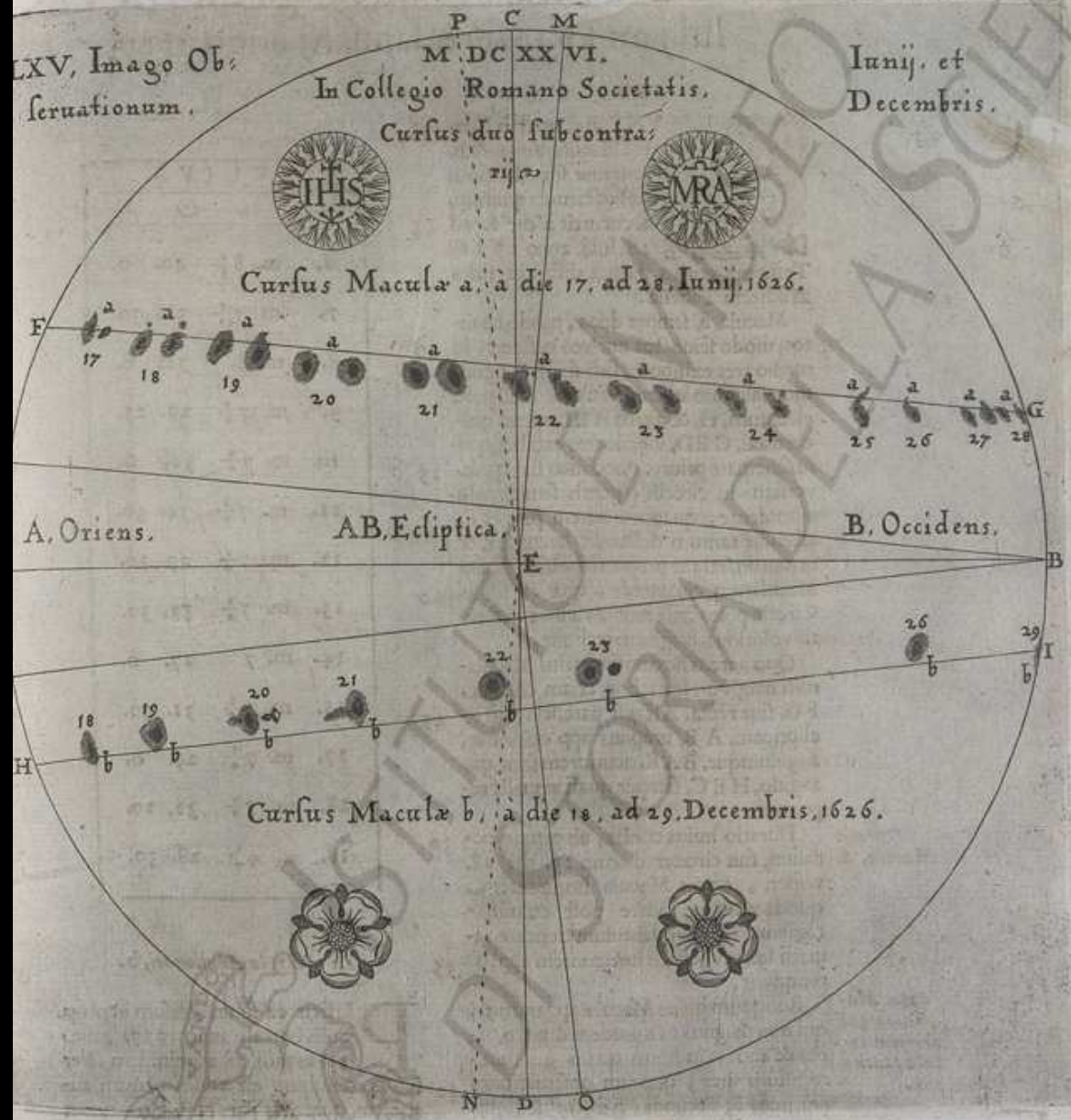
*Mouvement apparent des  
méridiens et parallèles  
solaires observés en  
projection*



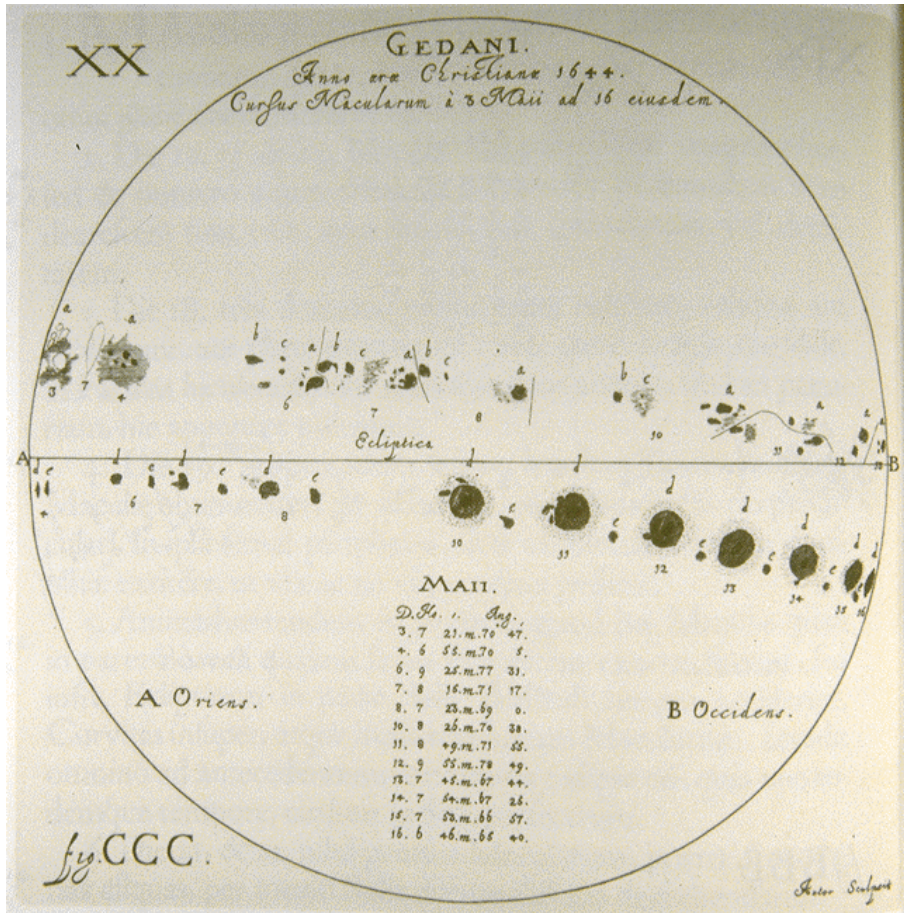




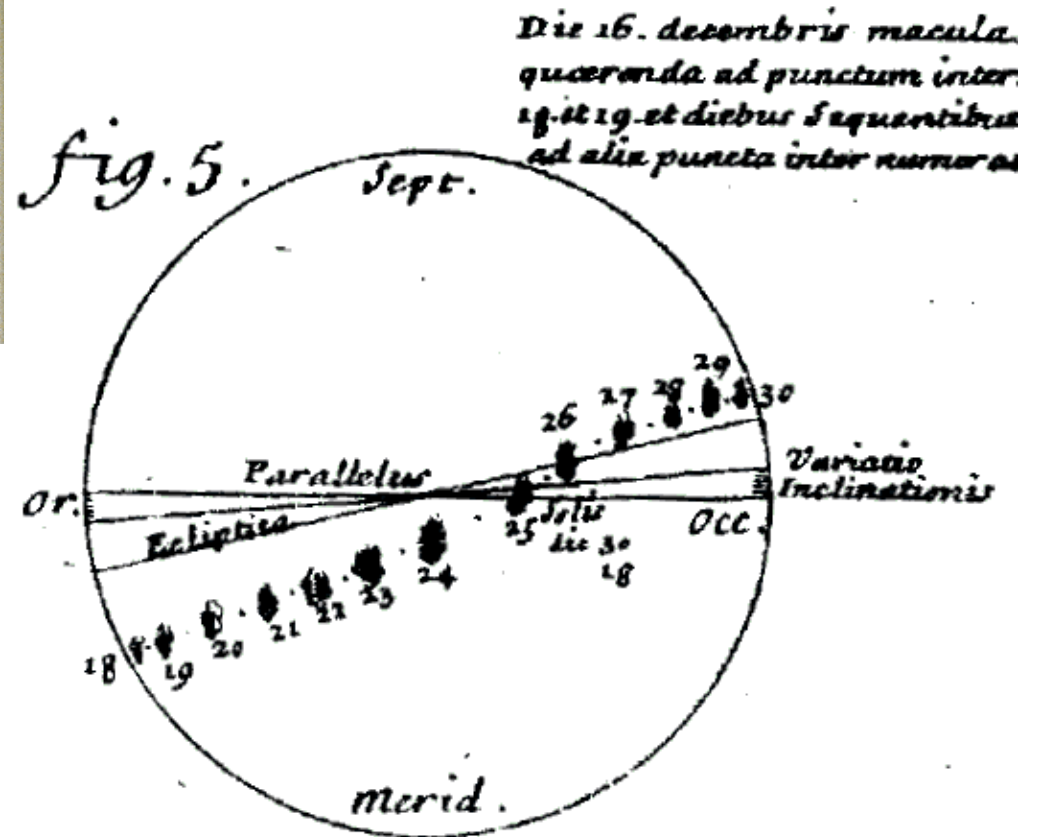
IMAGO SOLIS LXV. 323







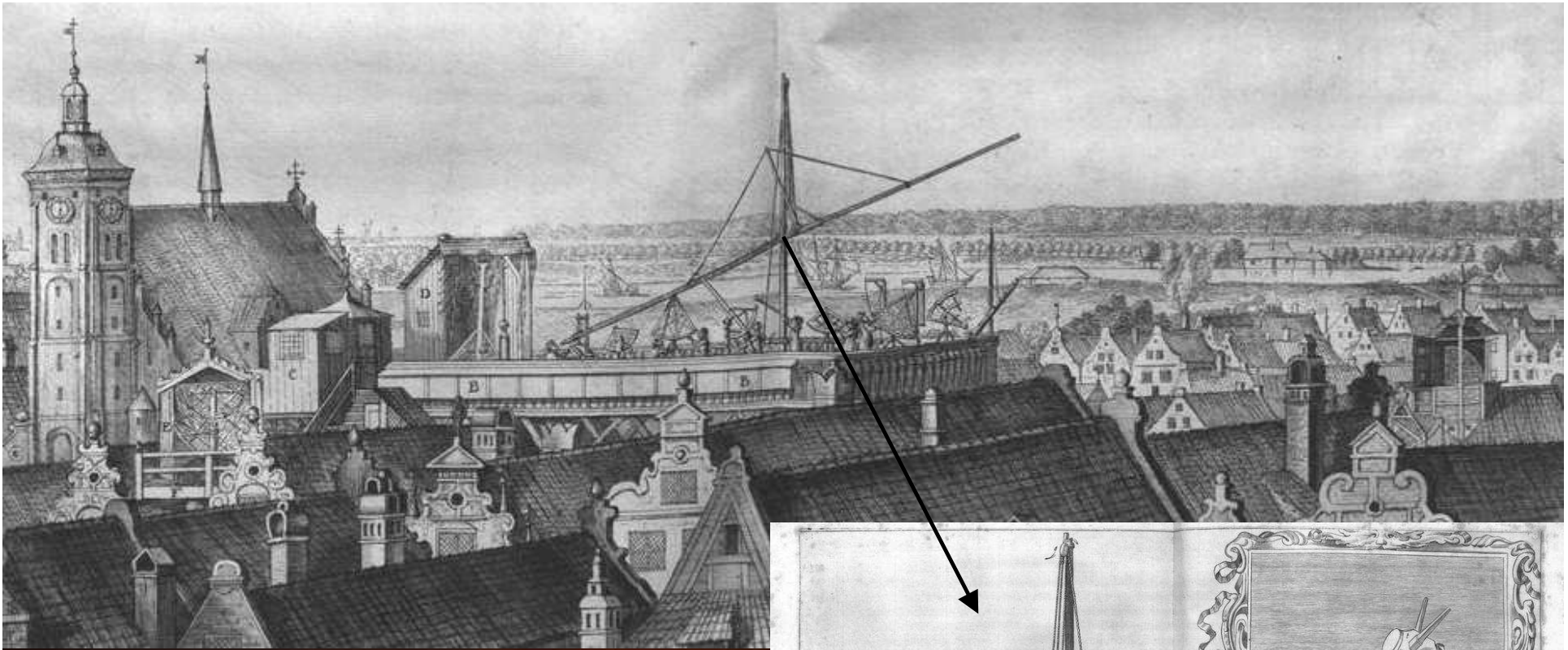
← Dessins d'Hevelius (1611-1687), en 1644, tiré de Selenographia (publié en 1647)  
4000 jours d'observation entre 1642 et 1684 !



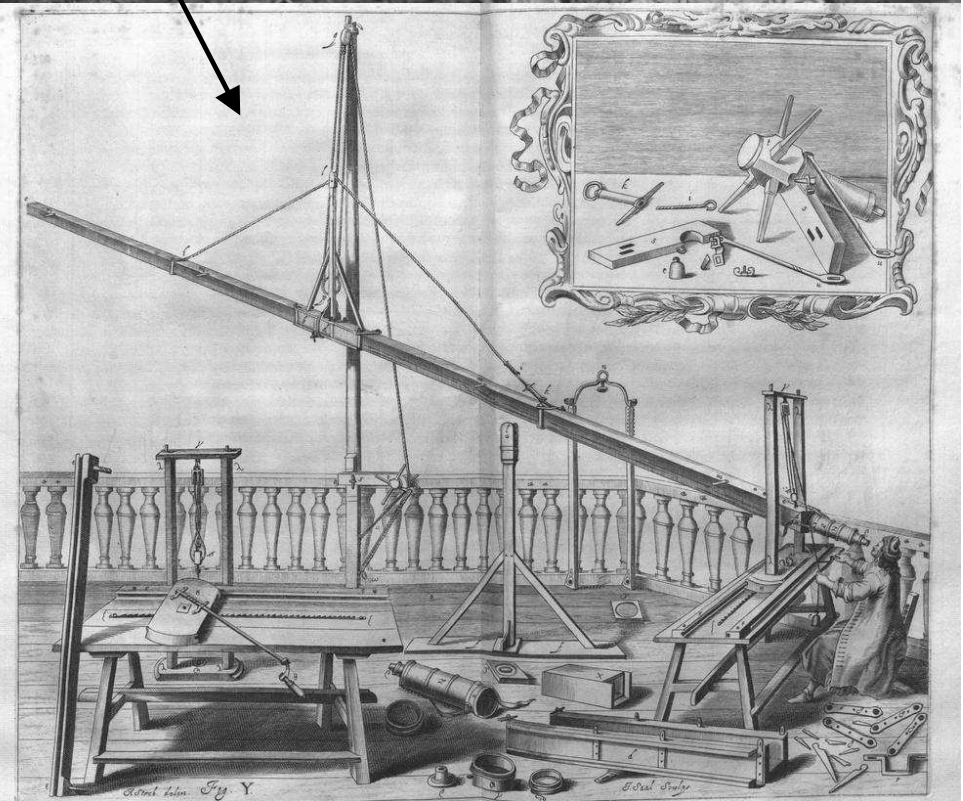
Dessin de Jean Dominique Cassini (1625-1712) daté de 1676, archives de l'Académie







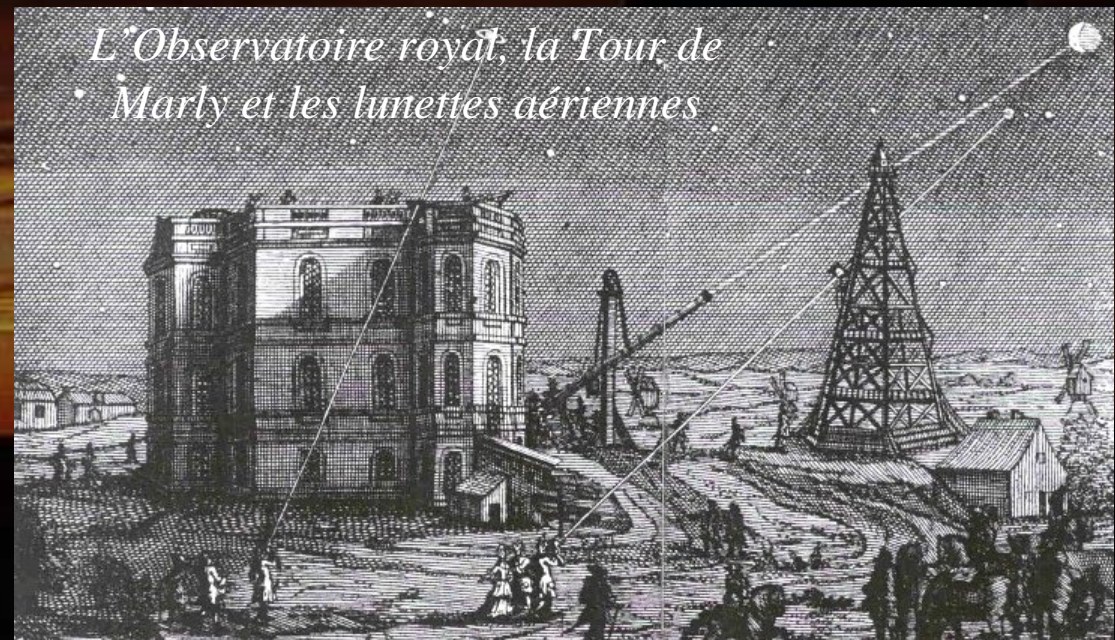
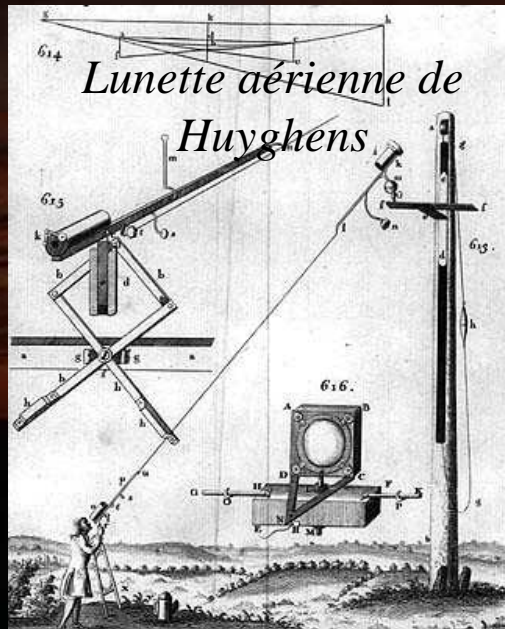
*Johannes Hevelius (1611-1687)  
observe à Gdansk à l'aide de  
lunettes suspendues (Machinae  
Coelestis, publié en 1673)*







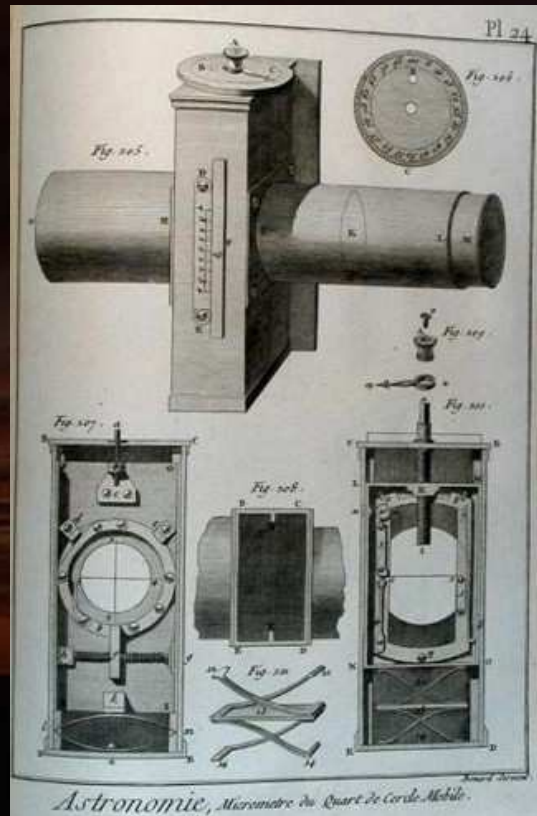
*1667: les sciences  
s'organisent avec la  
fondation de  
l'Observatoire  
Royal sous Louis  
XIV*





*Jean Picard (1620-1682) Adrien Auzout (1622-1691)*  
*Christian Huyghens (1629-1695) Philippe de la Hire (1640-1718)*

Le XVIIème siècle, siècle de la mesure et de l'astrométrie



*Quart de cercle méridien  
(chronodation des  
passages au méridien)*



*Horloges de Christian  
Huyghens marquant la  
seconde*

← *Oculaire  
micrométrique d'Adrien  
Auzout*





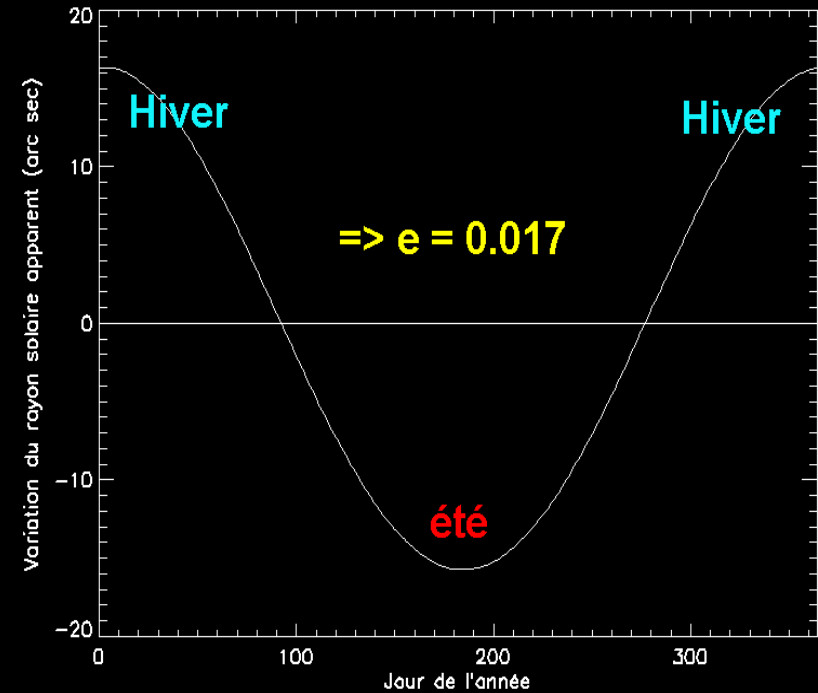
*astrométrie = mesure des positions*

*Dans le cas du soleil:*

*→ Mesures du diamètre*

*→ Mesures de position des taches*

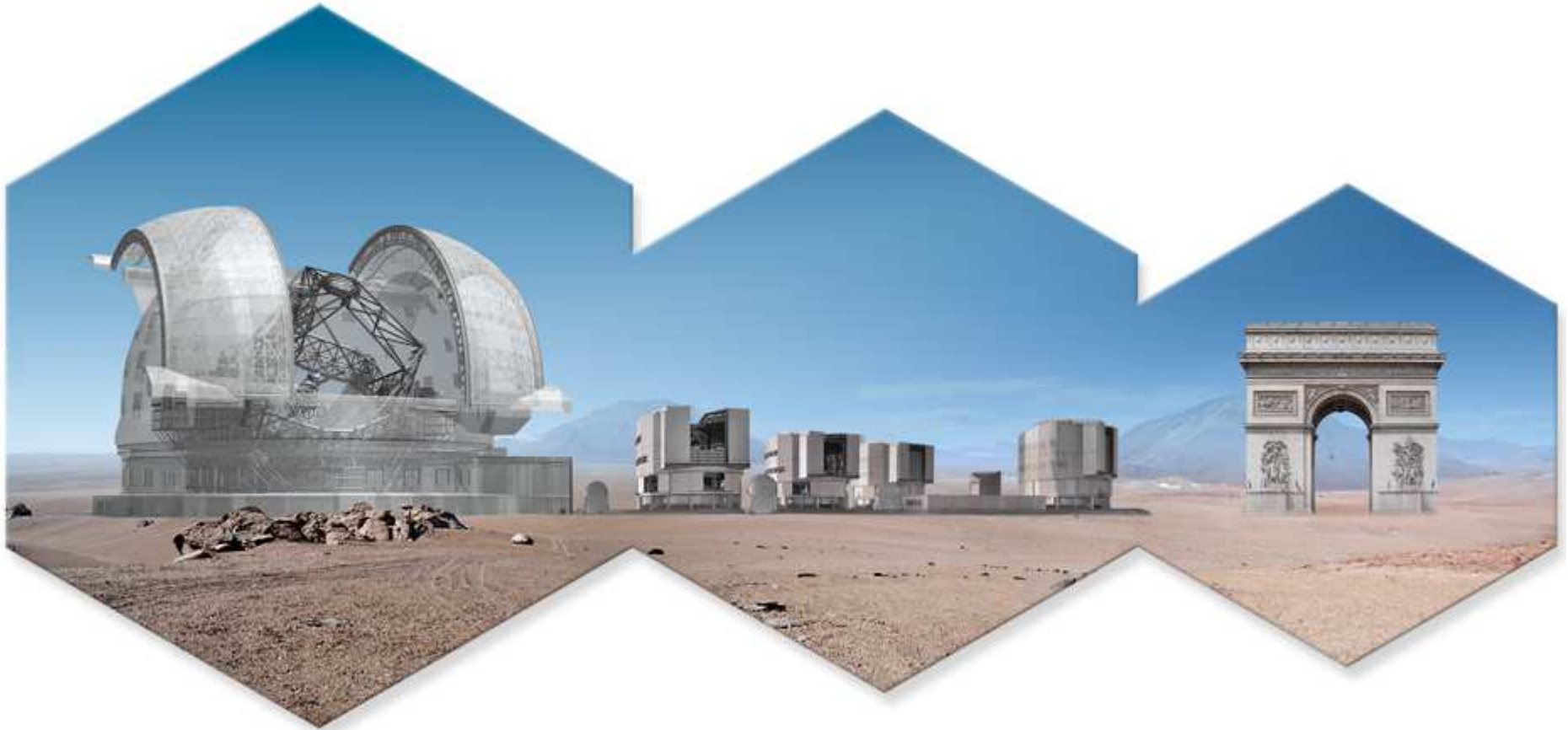
*Observateurs du diamètre au XVII/XVIIIème siècle*



*1666: Newton (1643-1727) découvre le spectre continu du Soleil*







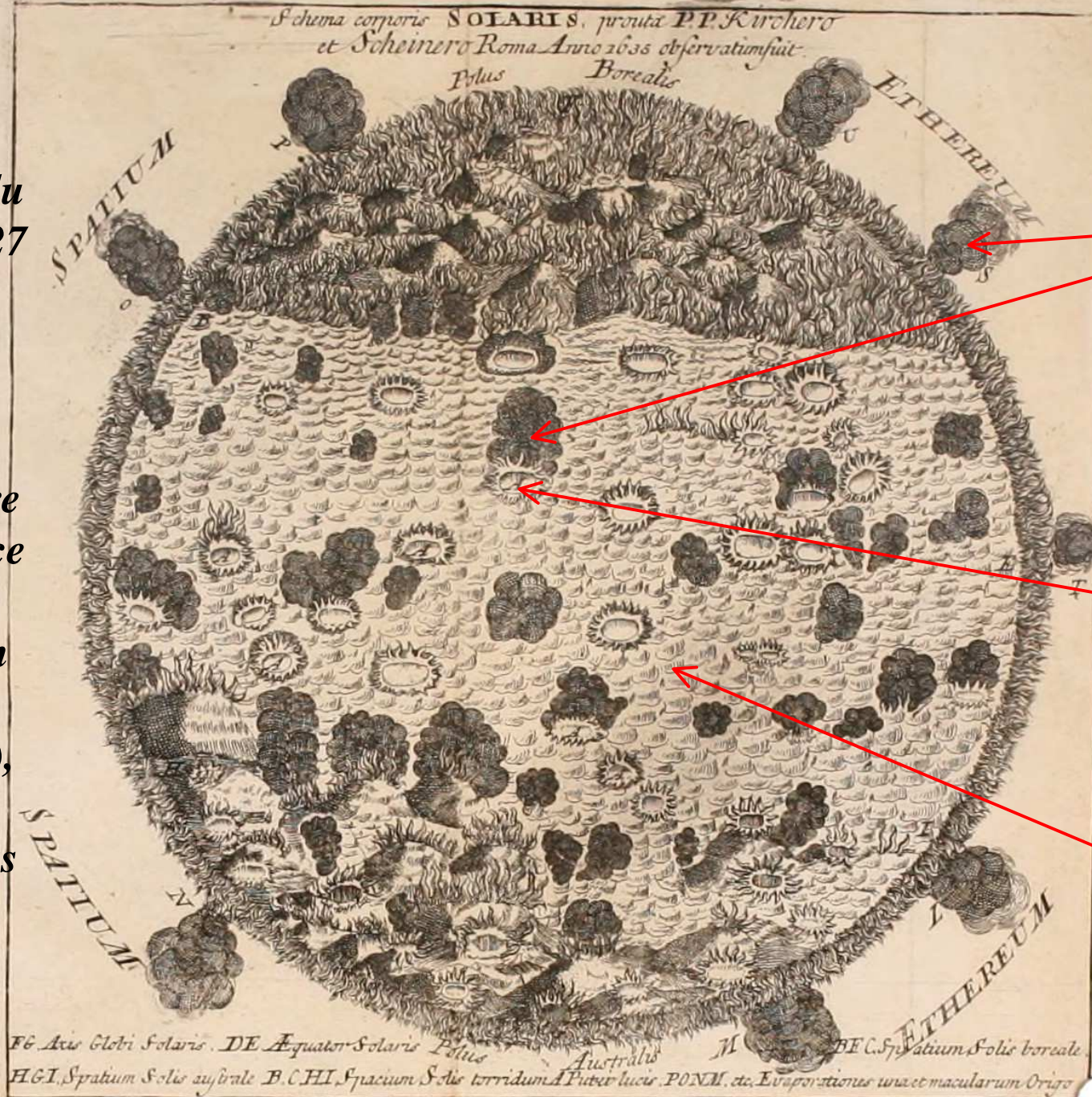
→ l'ELT européen fera 40 m de diamètre vers 2020 !

1687: Newton mathématise les lois de Kepler et calcule la masse  $M$  du Soleil





*Une vision du  
Soleil en 1727  
(Tobias  
Swinden,  
1659-1719,  
recherches  
sur la Nature  
et sur la place  
de l'enfer),  
dessin selon  
Kircher  
(1601-1680),  
Mundus  
subterraneus  
(1665)*



« Les  
exhalaisons  
et l'origine  
des taches »

« Les sources  
de la  
lumière »  
(facules ?)

« la région  
du Soleil  
brûlante »

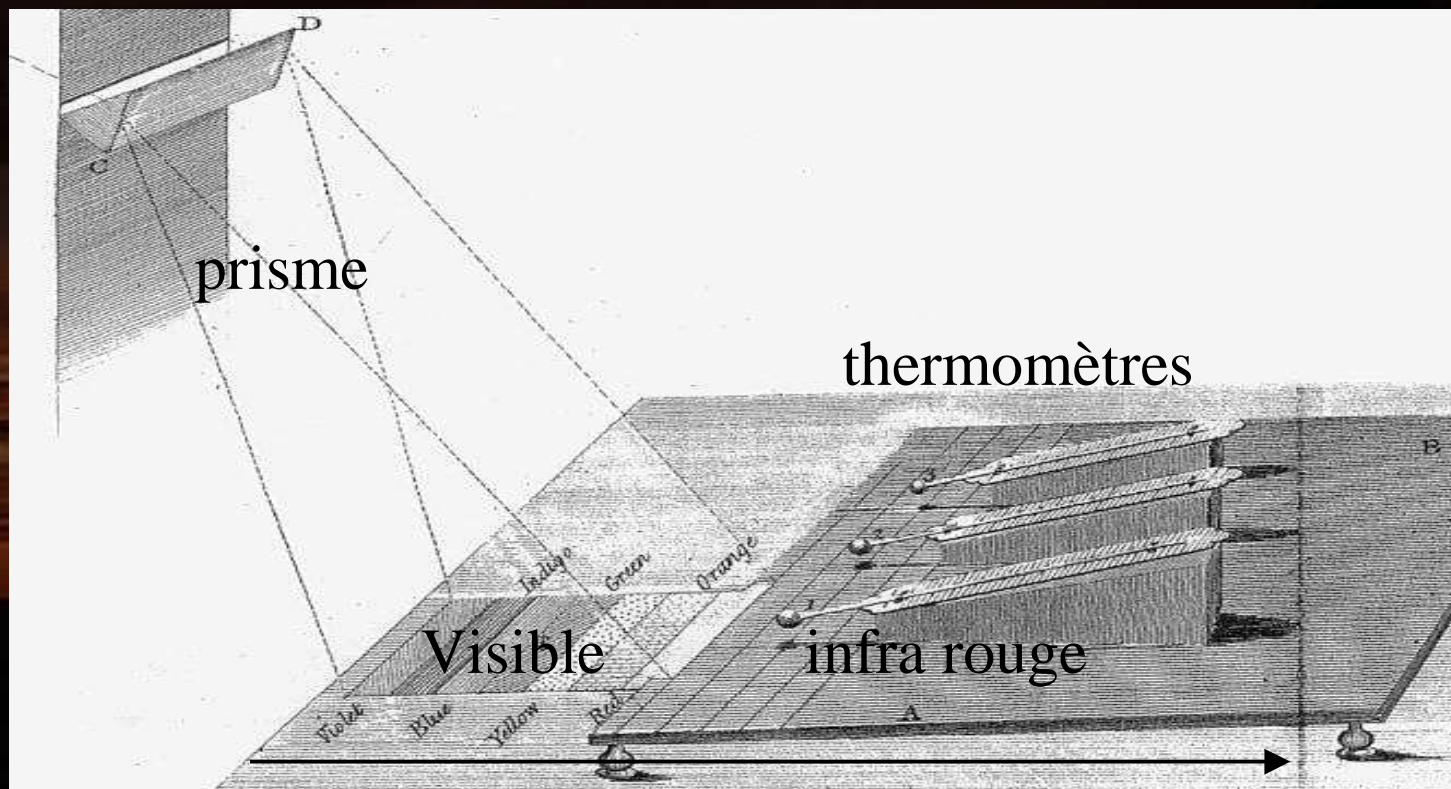




XIX<sup>ème</sup> siècle

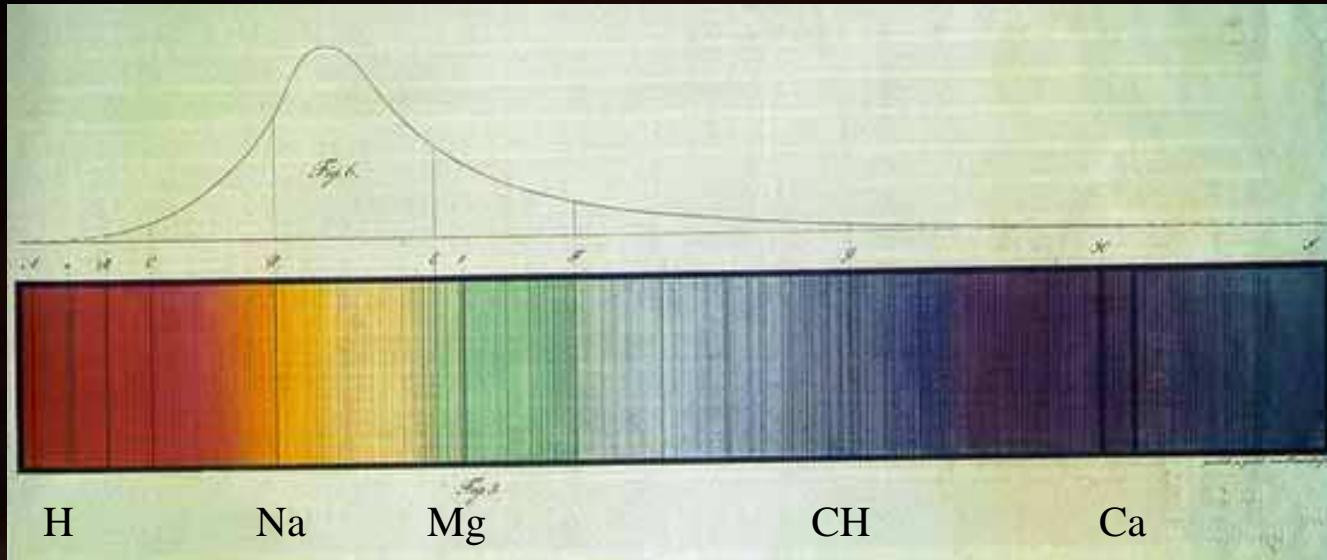


*1800: William Herschell (1738-1822) découvre le rayonnement infrarouge du Soleil (la moitié de l'énergie solaire !)*





*1817: Joseph von Fraunhofer (1787-1826) découvre le spectre de raies d'absorption du Soleil*

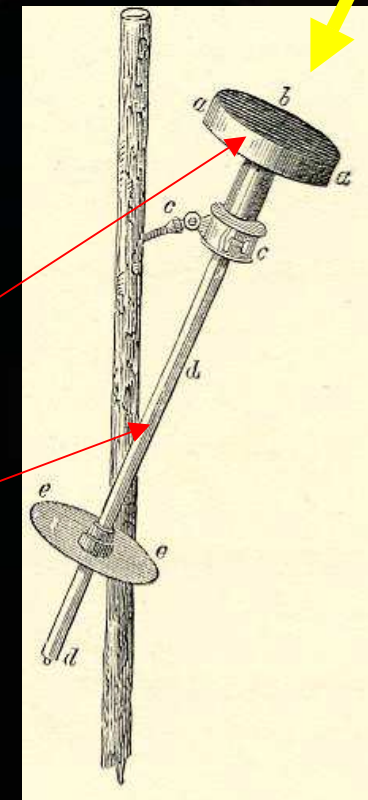


*1838: première tentative de mesure de la « constante solaire » avec le pyrhéliomètre de Claude Pouillet (1790-1868)*

Eau + capot noir

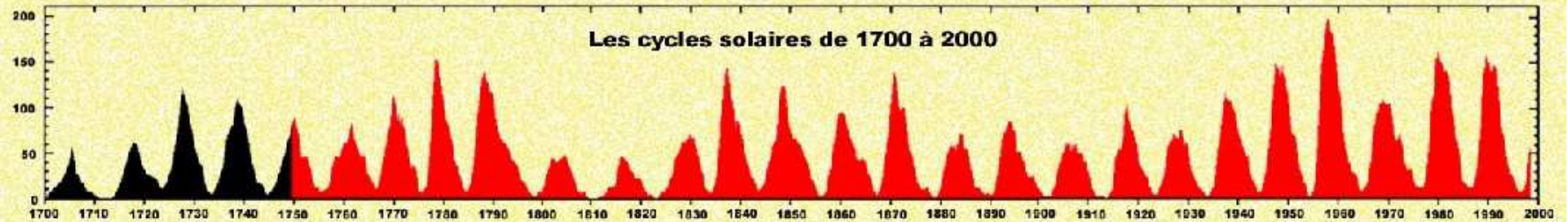
thermomètre

*→ Estimation de la température de surface du Soleil et de sa luminosité*

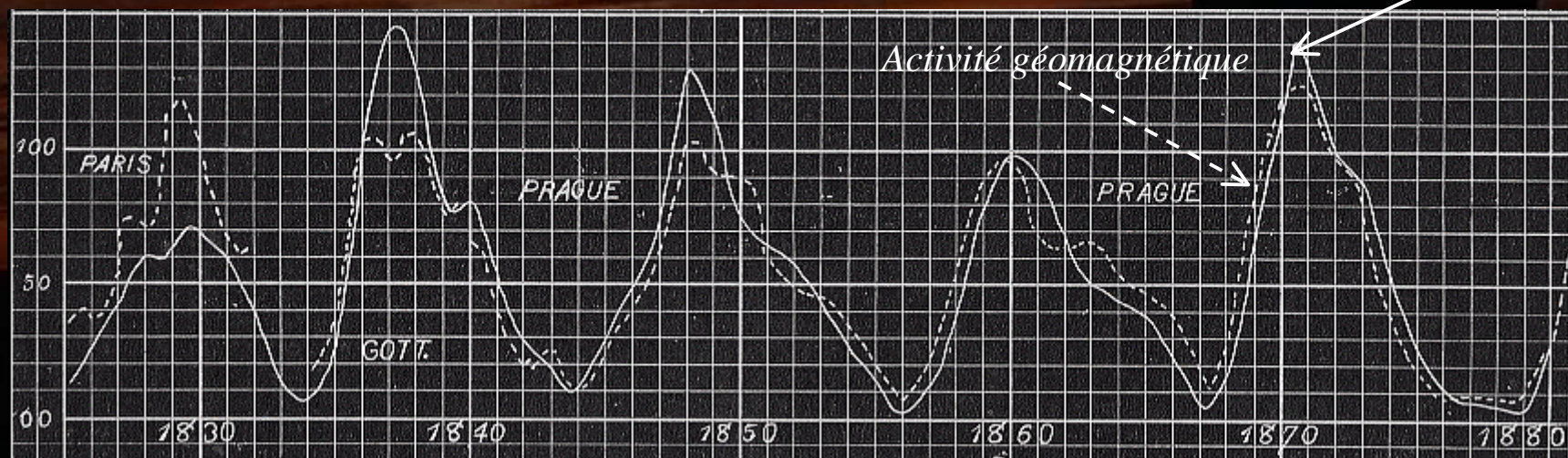




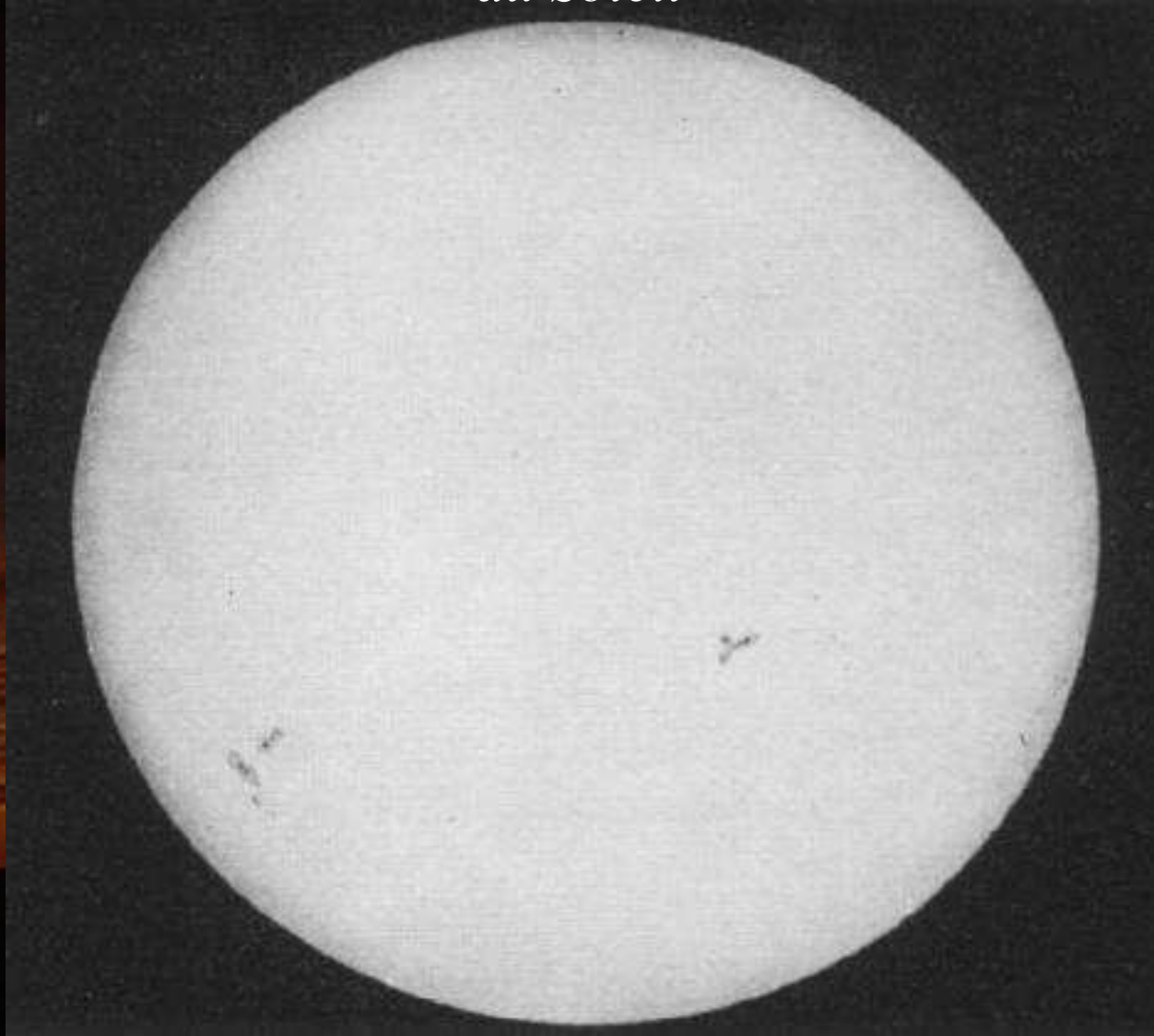
*1843: découverte du cycle des taches de 11 ans par Heinrich Schwabe (1789-1875)*



*1852: Edward Sabine (1788-1883) découvre la corrélation entre l'activité géomagnétique (fluctuations du champ magnétique terrestre) et l'activité solaire*

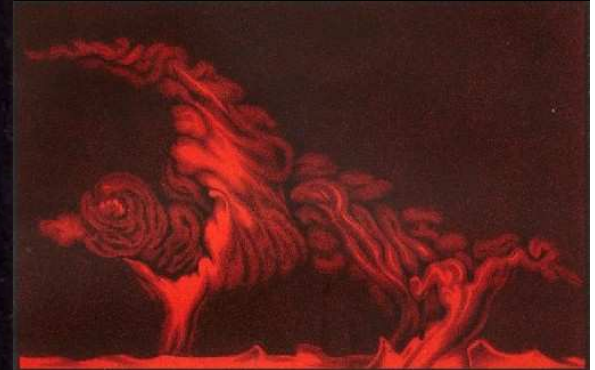
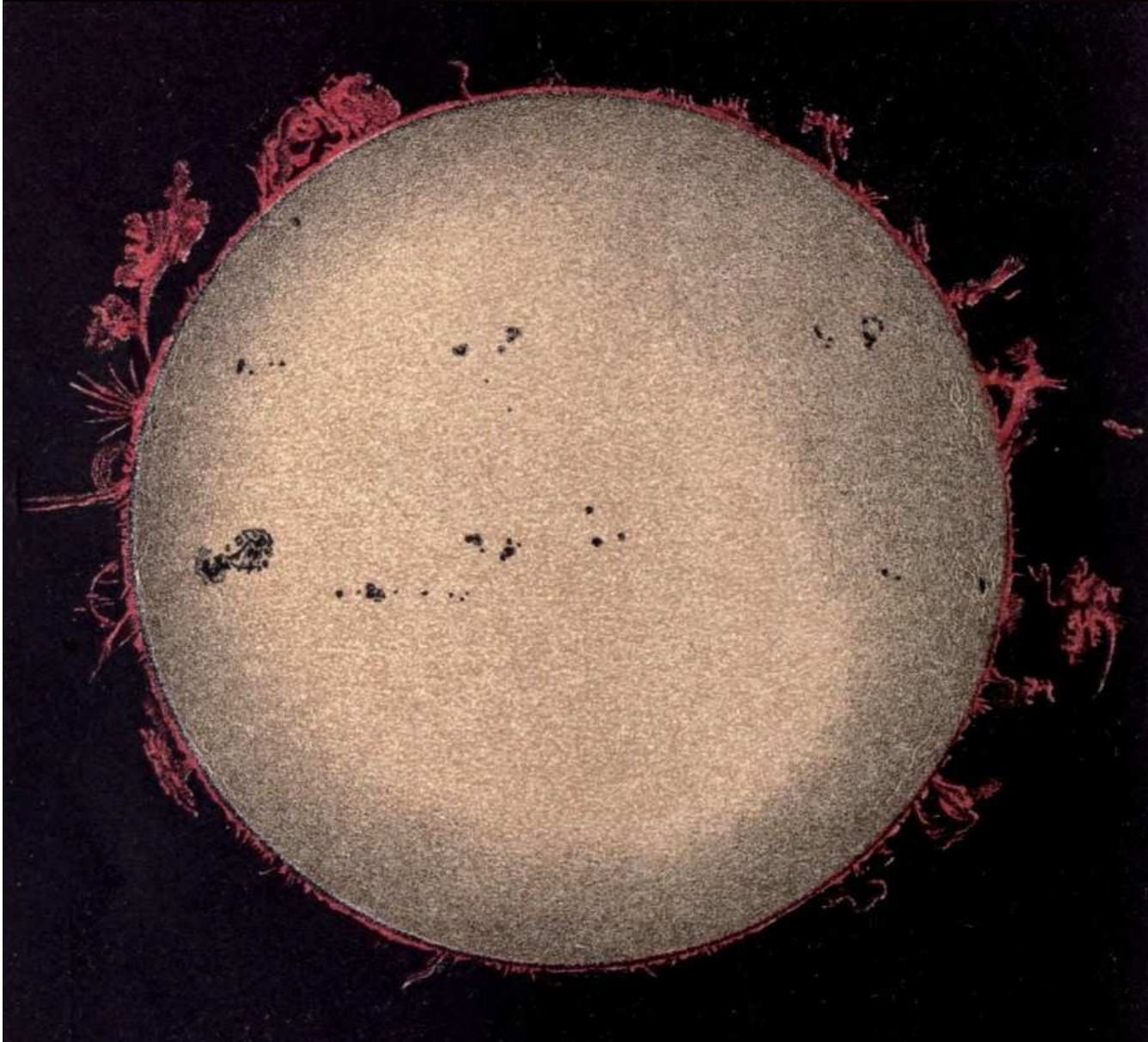


1845: *première révolution* ; Hippolyte Fizeau (1819-1896) et  
Léon Foucault (1819-1868) réalisent le premier daguerréotype  
du Soleil

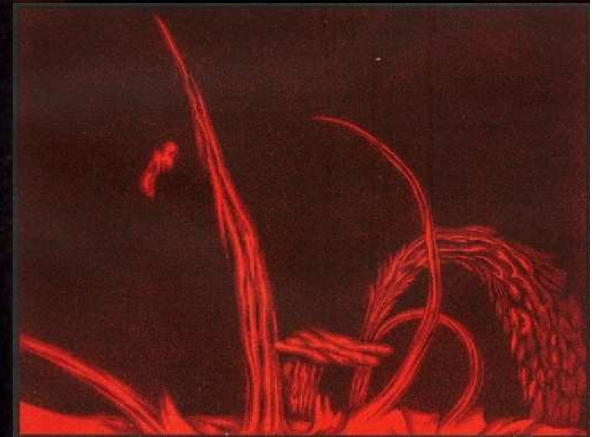


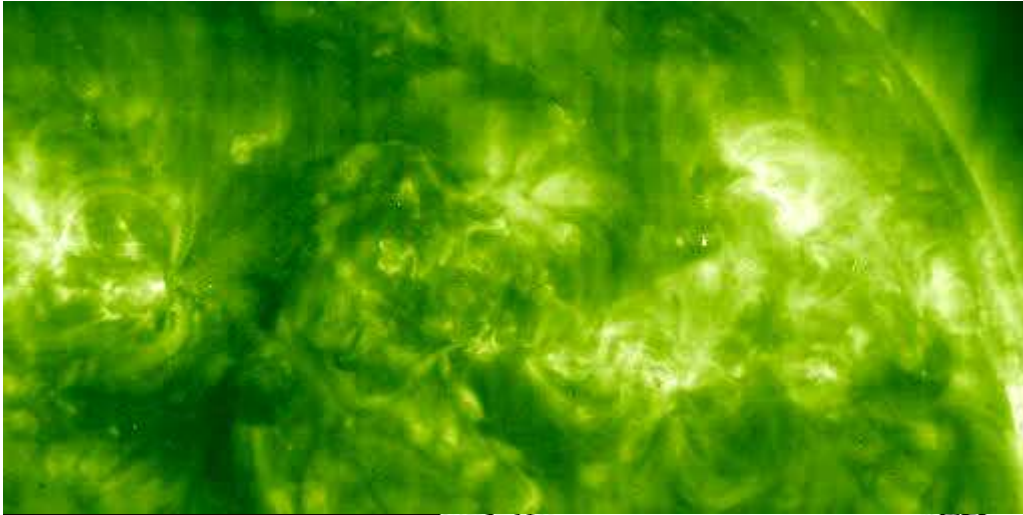


*La photographie mettra fin au dessin... Ici les pastels  
d'Etienne Trouvelot (1827-1895)*



protubérances

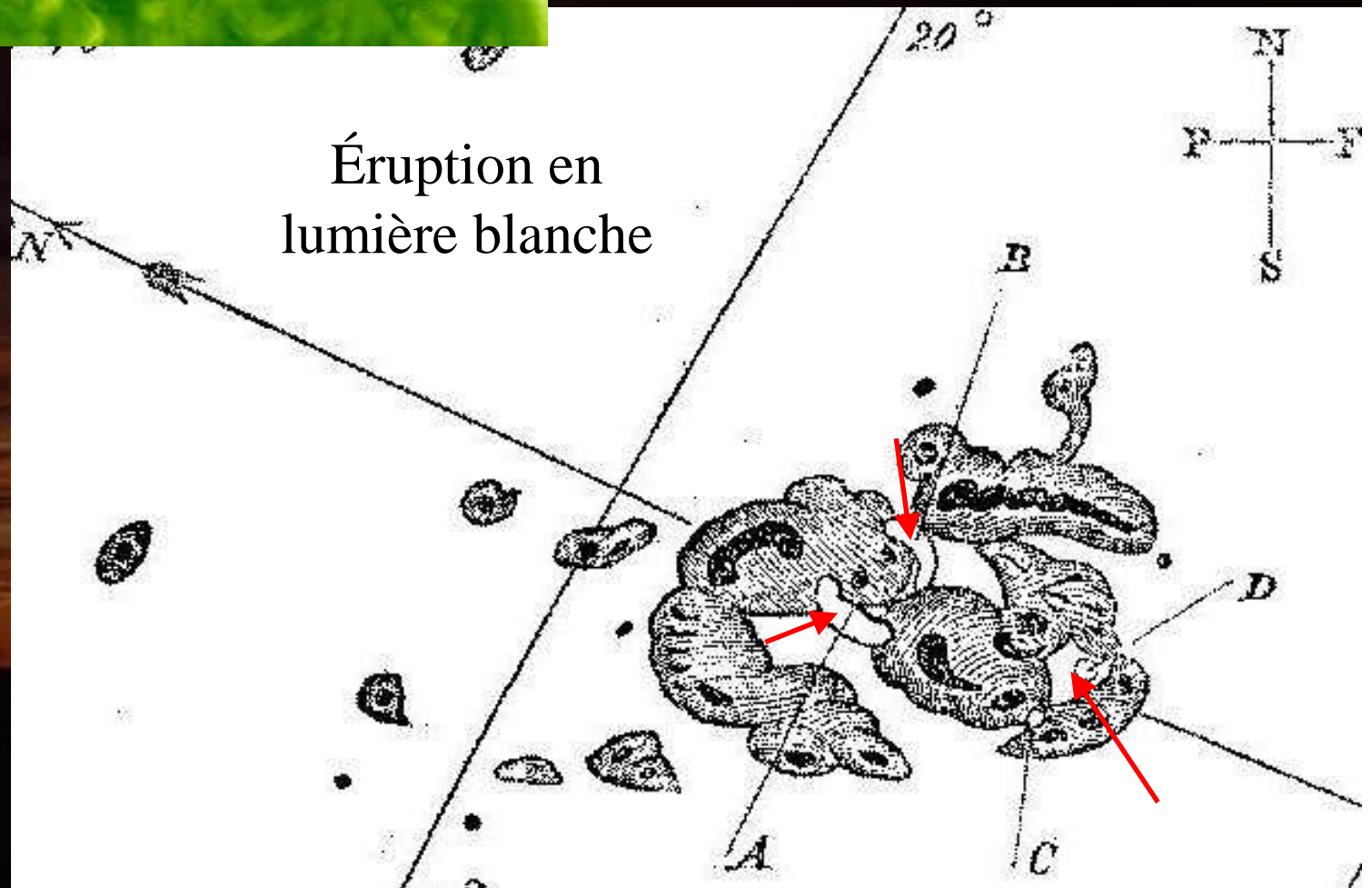




*1858: Richard Carrington  
(1826-1875) découvre la  
rotation différentielle du Soleil  
et observe la première  
éruption solaire*

*Le Soleil  
tourne plus  
vite à  
l'équateur*

Éruption en  
lumière blanche





# *L'éclipse du 18 Août 1868 : **seconde révolution** ; le triomphe de la spectroscopie*

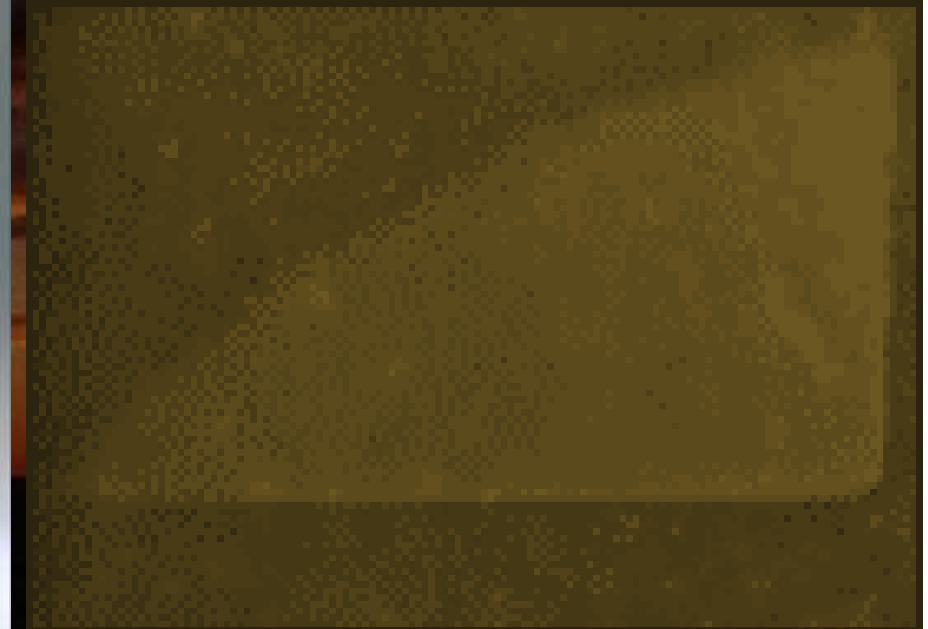
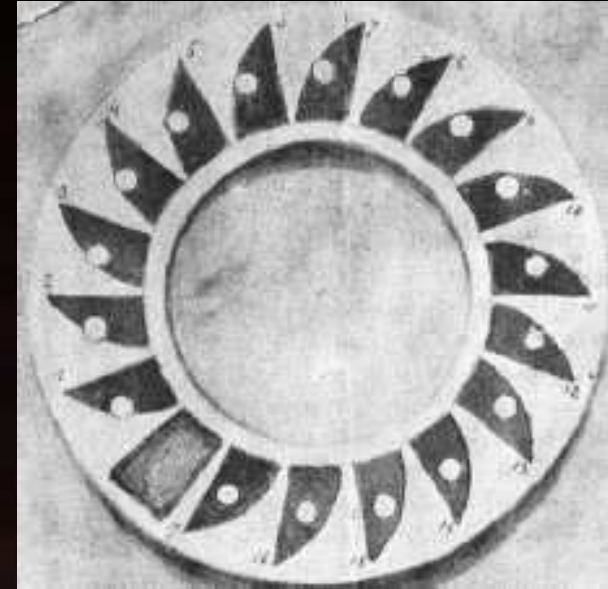
*Jules Janssen (1824-1907) et Norman Lockyer (1836-1920) démontrent la possibilité d'observer les protubérances hors éclipse*





1874

*Janssen et le revolver  
photographique, ancêtre du  
cinématographe*

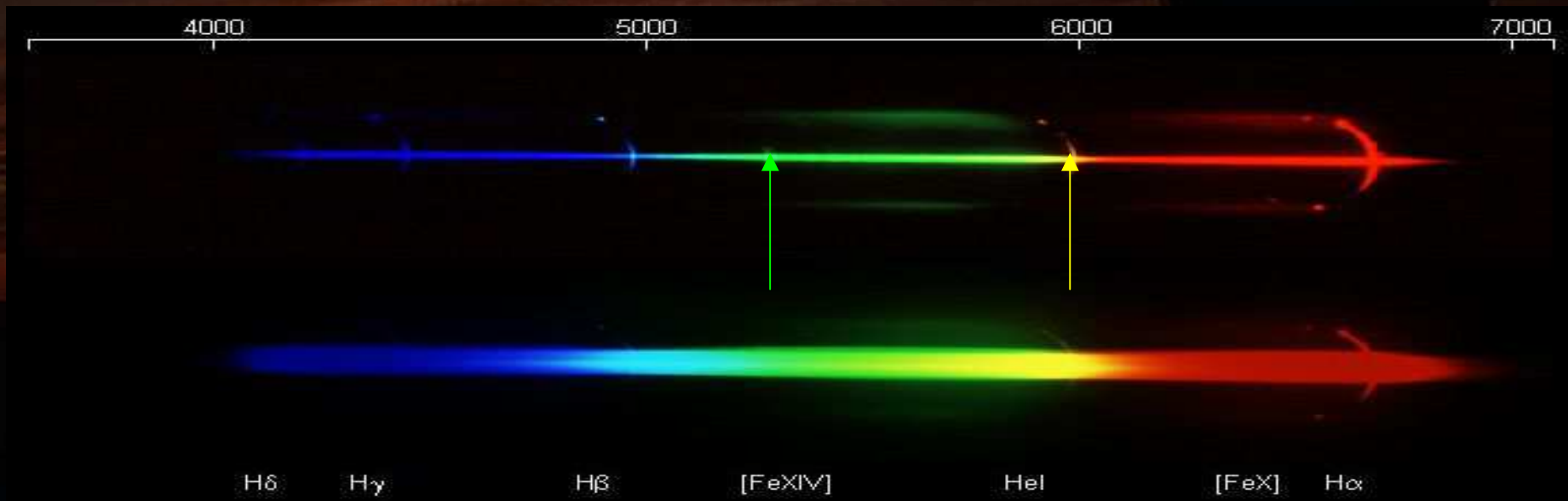




***L'éclipse du 18 Août 1868 ou le triomphe de la spectroscopie:***

*Jules Janssen (1824-1907) et Norman Lockyer (1836-1920)  
découvrent l'**HELIUM** par sa signature dans le spectre du Soleil  
(raie jaune HeI D3 587.5 nm)*

***Eclipse du 7 Août 1869:*** *Thomas Young (1834-1908) découvre les  
raies « interdites » de la couronne (la « raie verte »); le nouvel  
élément en cause est baptisé **CORONIUM** et sera identifié 70 ans  
plus tard comme émis par le Fer 13 fois ionisé à 530.2 nm*



*Fe XIV 530.2 nm*

*Raie « interdite »*

*(désexcitation radiative  
lente inobservable en  
dehors des plasmas chauds  
à  $10^6$  K et très dilués) →*

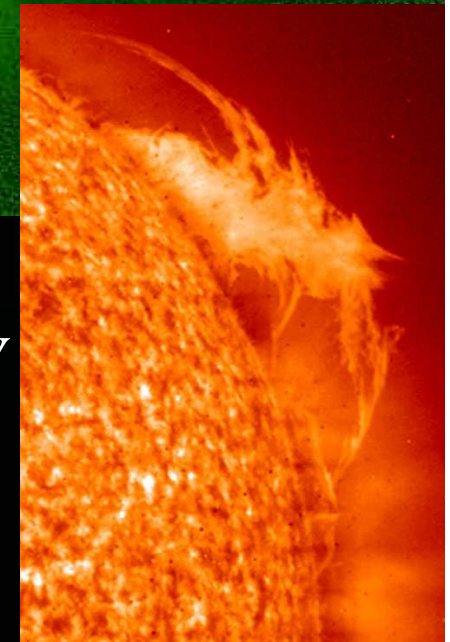
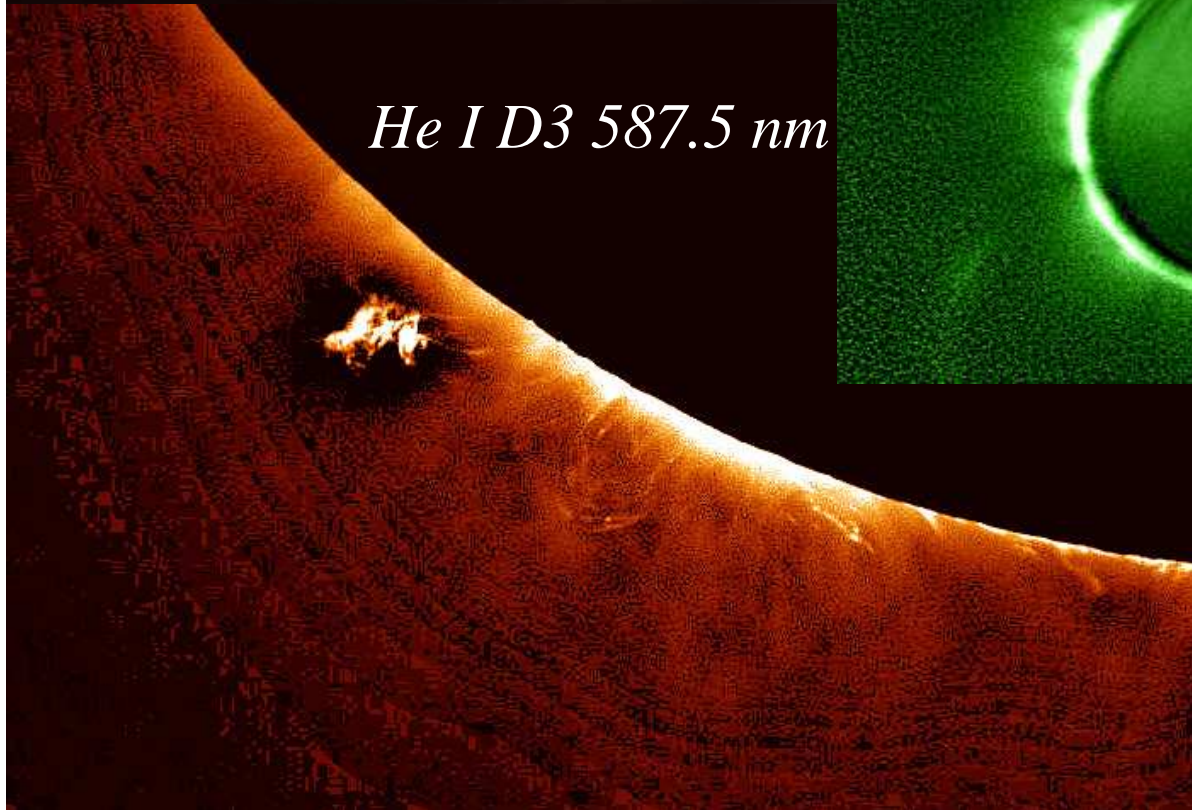
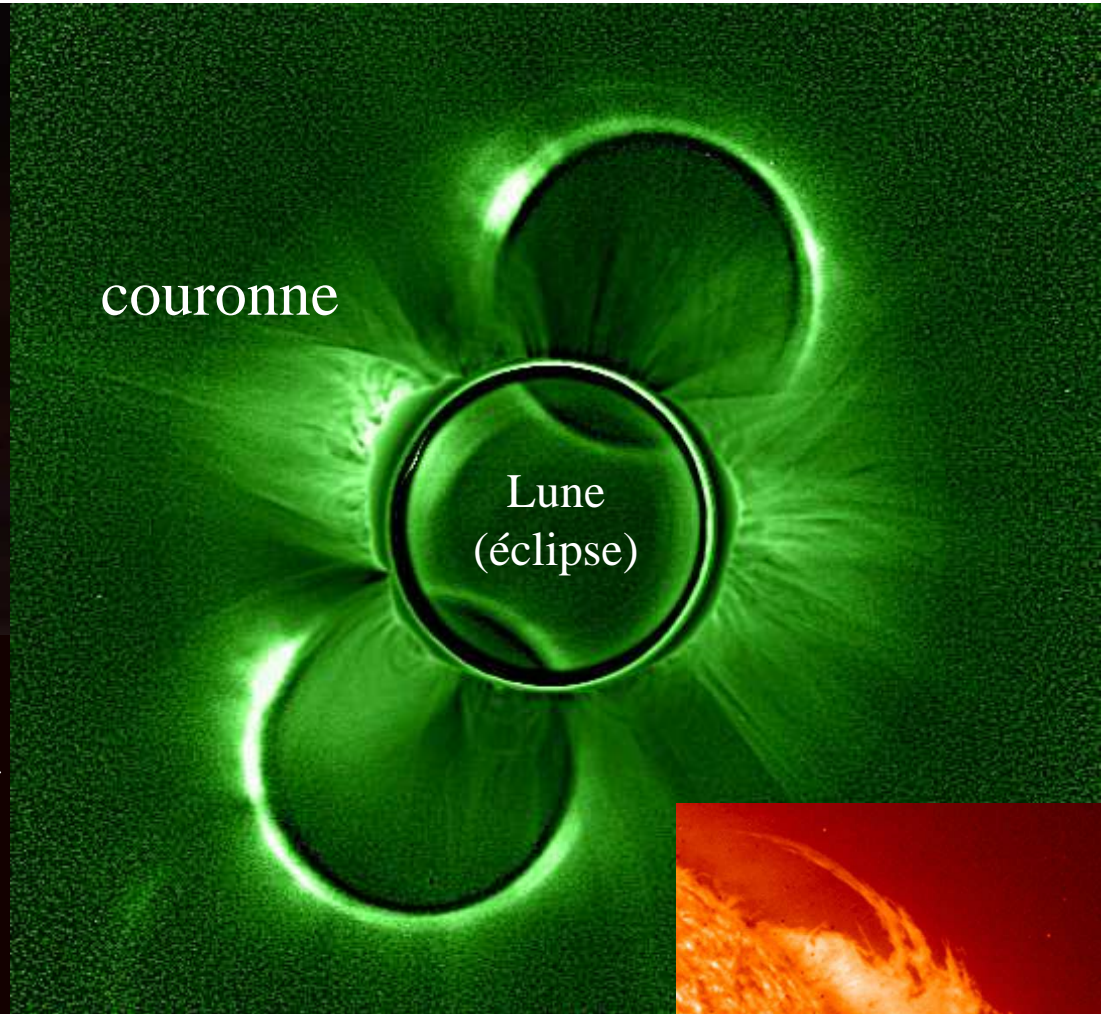
couronne

Lune  
(éclipse)

*He I D3 587.5 nm*

*He II EUV*

*30.4 nm*



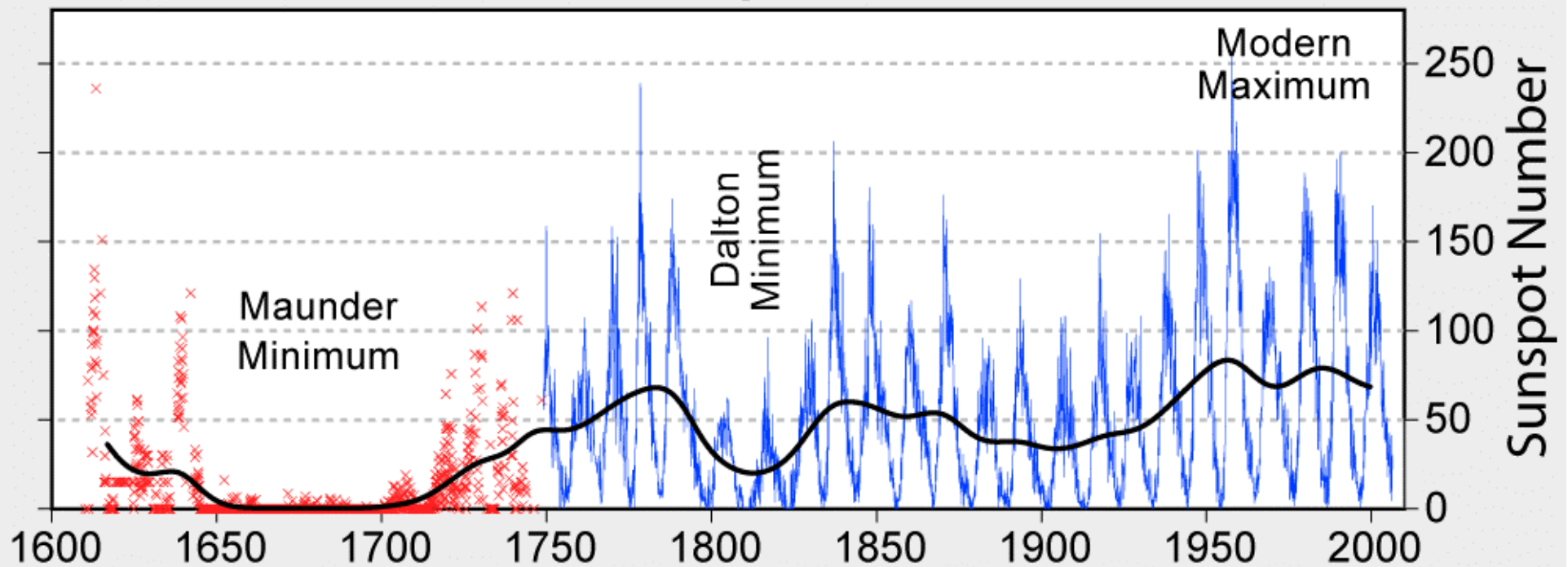


# Les anomalies du cycle solaire

*Le Minimum de Maunder*

*1645-1705*

# 400 Years of Sunspot Observations

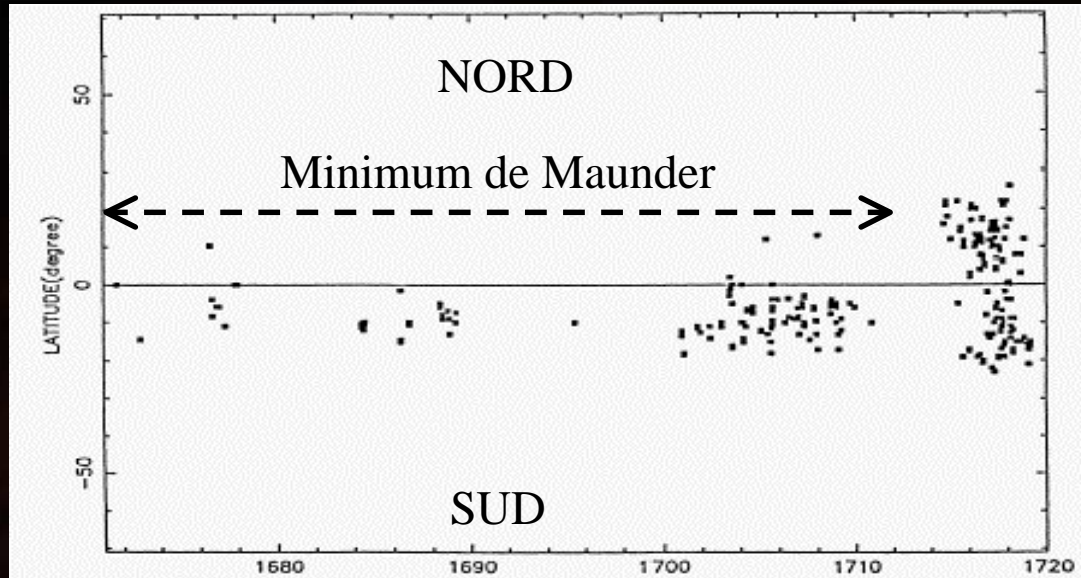


*1890: Gustav Spörer  
(1822-1895) et Edward  
Maunder (1851-1928)  
découvrent le minimum  
prolongé de 1645-1705*

*« C'est la 3ème tache qui a paru en cette année 1676,  
dans laquelle elles ont été plus fréquentes qu'elles  
n'avoient été pendant 20 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... »*

*J.-D. Cassini, archives de l'Académie*



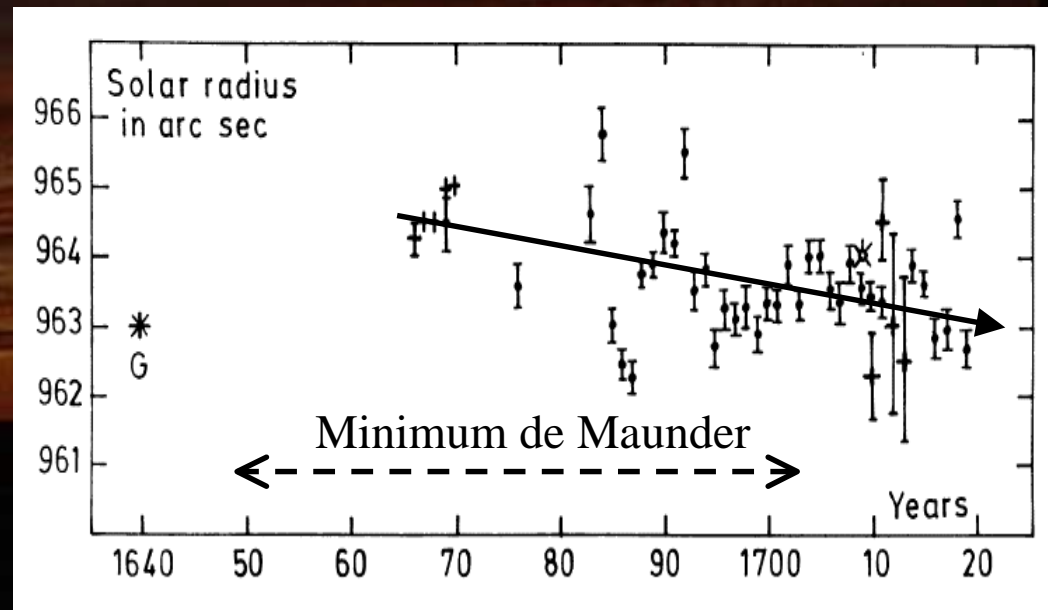


*Minimum de Maunder  
1645-1705 :*

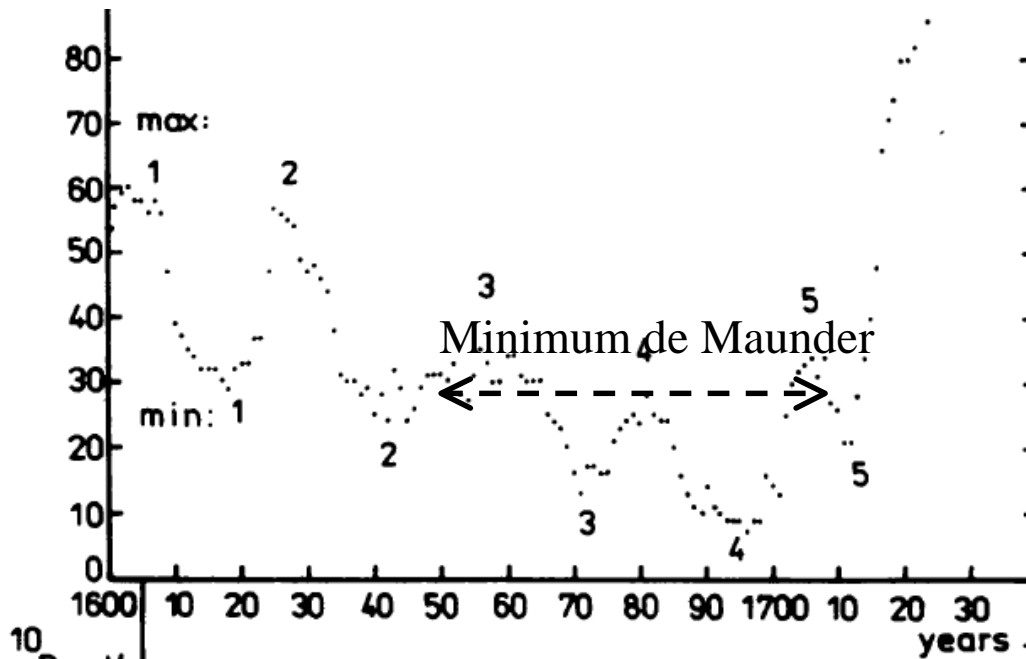
*Asymétrie Nord Sud des  
taches ?*

*Minimum de Maunder : une interrogation fondamentale laissée par le XVIIème siècle*

*Observations  
de Picard et  
La Hire*



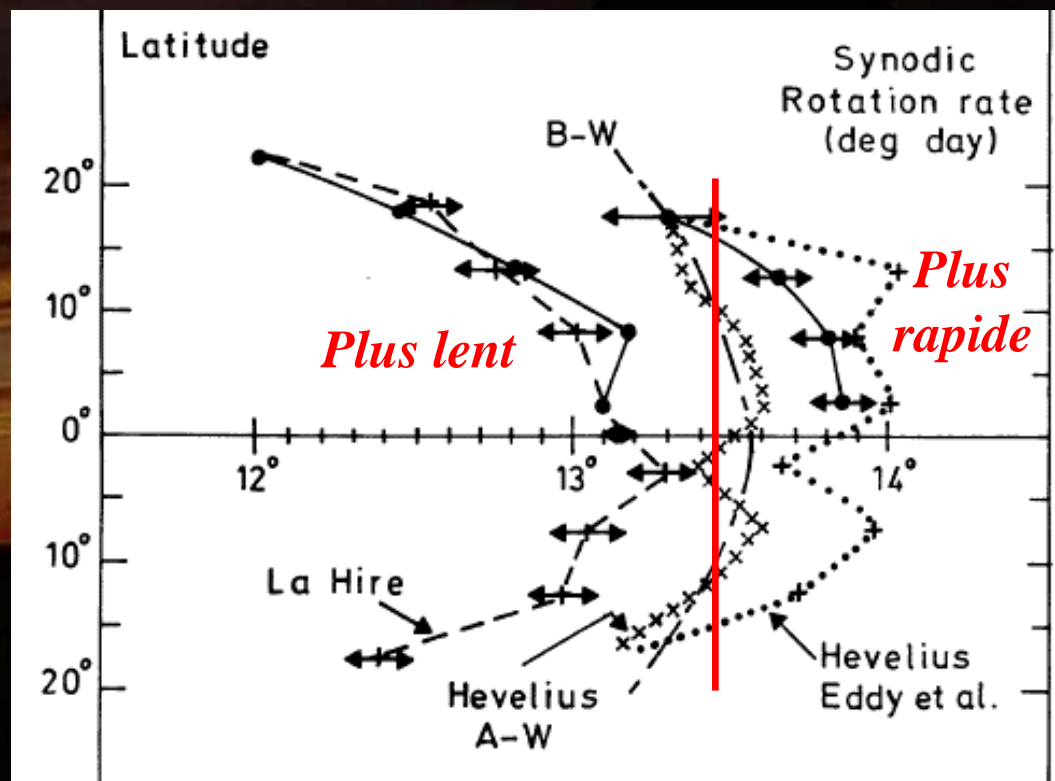
*Minimum de  
Maunder :  
Soleil plus gros ?*



**Minimum de Maunder 1645-1705  
une interrogation fondamentale  
laissée par le XVIIème siècle**

← *Diminution des aurores boréales, mais le cycle solaire semble rester présent*

*anomalie possible de la vitesse de rotation des taches (résultats contradictoires selon les observateurs et les interprétations) →*





XVII-XVIIIème siècle  
Petit âge glaciaire



XIXème siècle

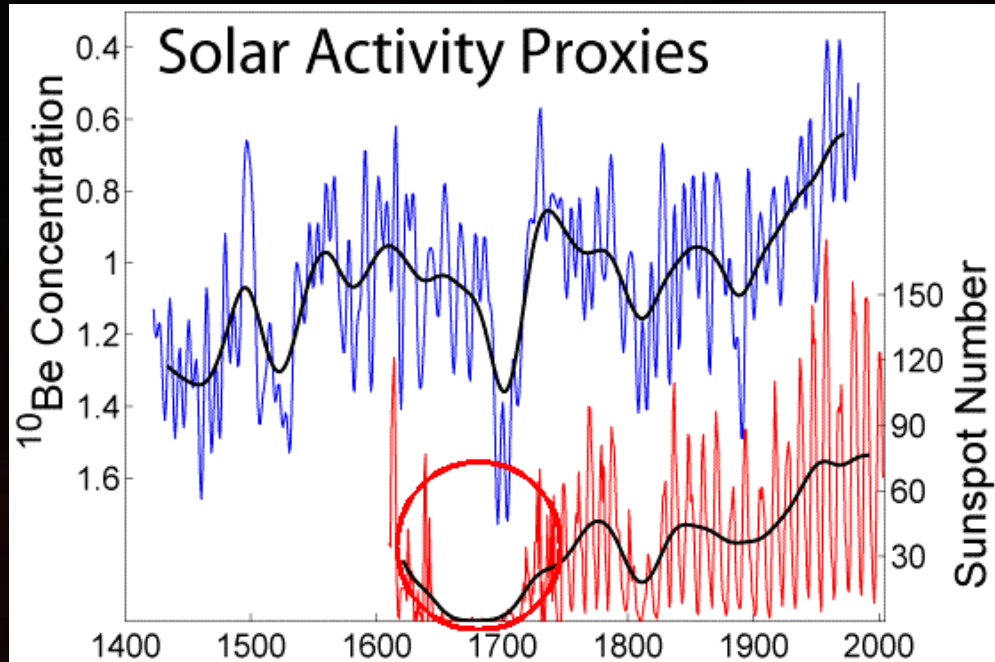


Vague de froid en Europe: le petit âge glaciaire (1550-1700)  
Avancée des glaciers; la Tamise gelée durant plusieurs mois en hiver

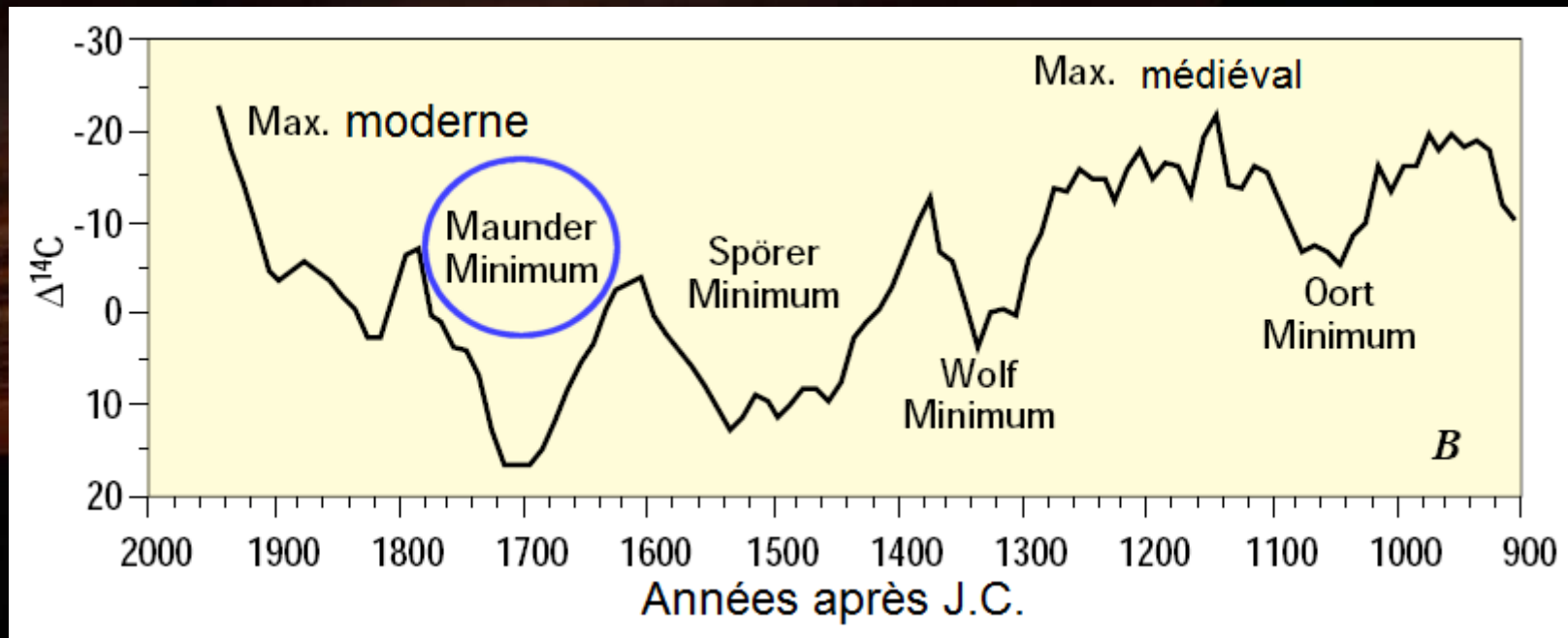


L'air du génie  
du froid / Opéra  
du Roi Arthur  
d'Henry Purcell  
(1659-1695)  
est-il inspiré de  
cet épisode ?






La mesure de la concentration des isotopes cosmogéniques  $^{14}\text{C}$  et  $^{10}\text{Be}$  produits dans l'atmosphère permet de reconstruire l'activité solaire sur le long terme (l'intensité des rayons cosmiques est plus faible au maximum car ils sont déviés par le champ magnétique fort)

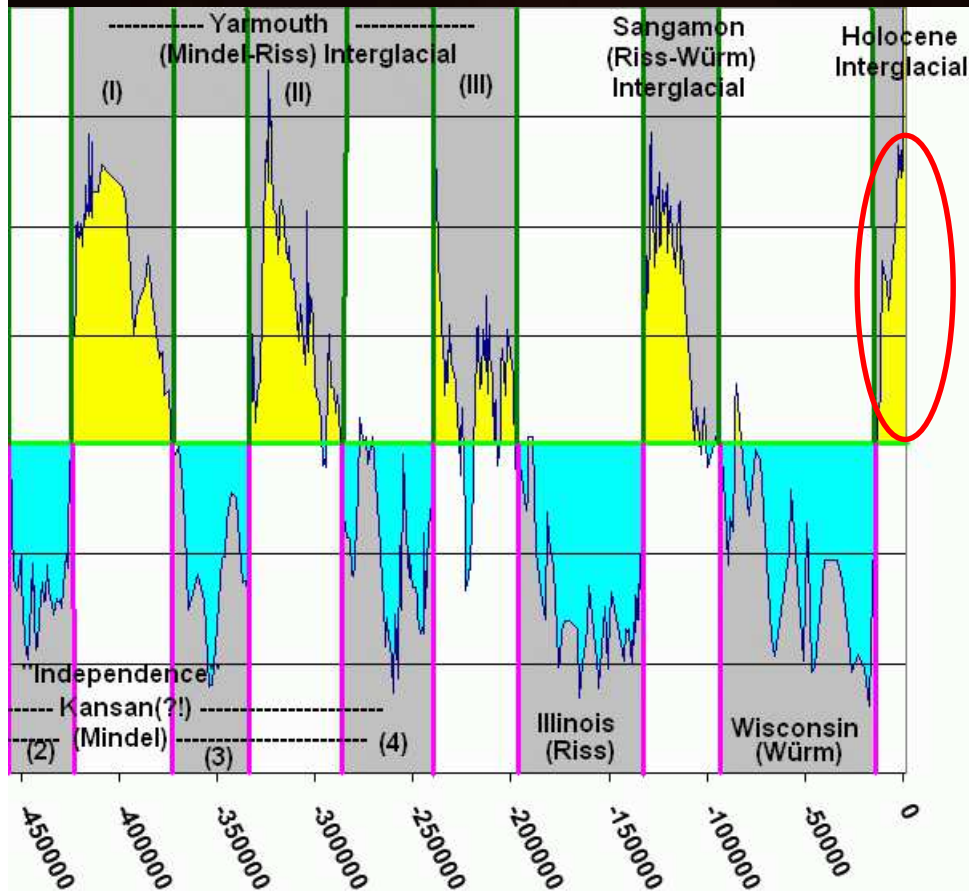




A person's silhouette is visible on the right side of the image, looking out over a desert landscape at sunset. The sky is a mix of orange, yellow, and dark blue, with the sun low on the horizon. The foreground shows the dark, undulating dunes of a desert.

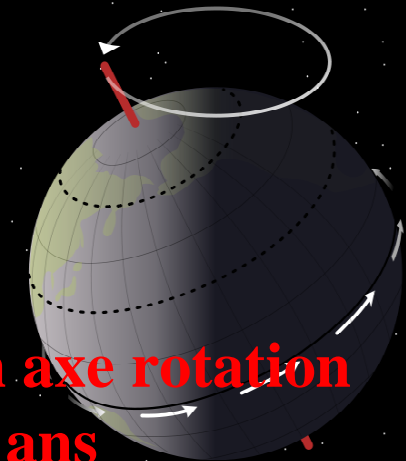
Variabilité  
solaire et lien  
avec le climat ?

# Les variations longues du climat (100000 ans, cycles de Milankovitch, 1941) sont de nature purement astronomique

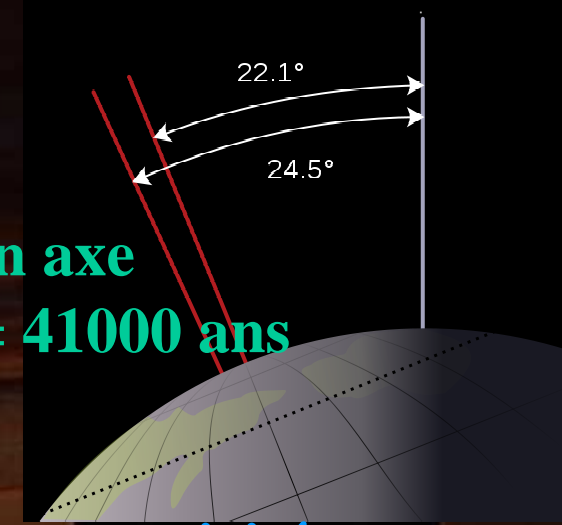


Température (concentration CO<sub>2</sub>) → Cycles glaciaires/interglaciaires (interglaciaire depuis 12000 ans)

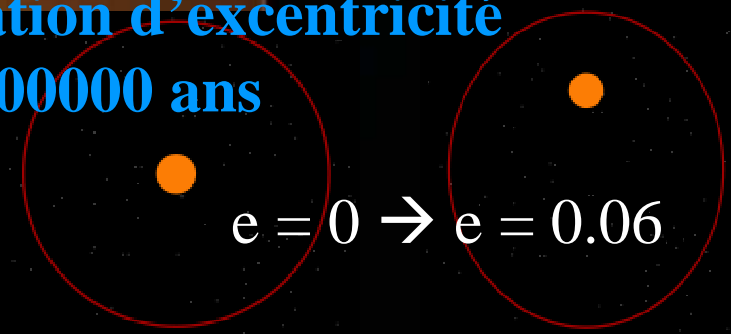
**Précession axe rotation**  
**T = 26000 ans**



**Variation d'inclinaison axe rotation**  
**T = 41000 ans**

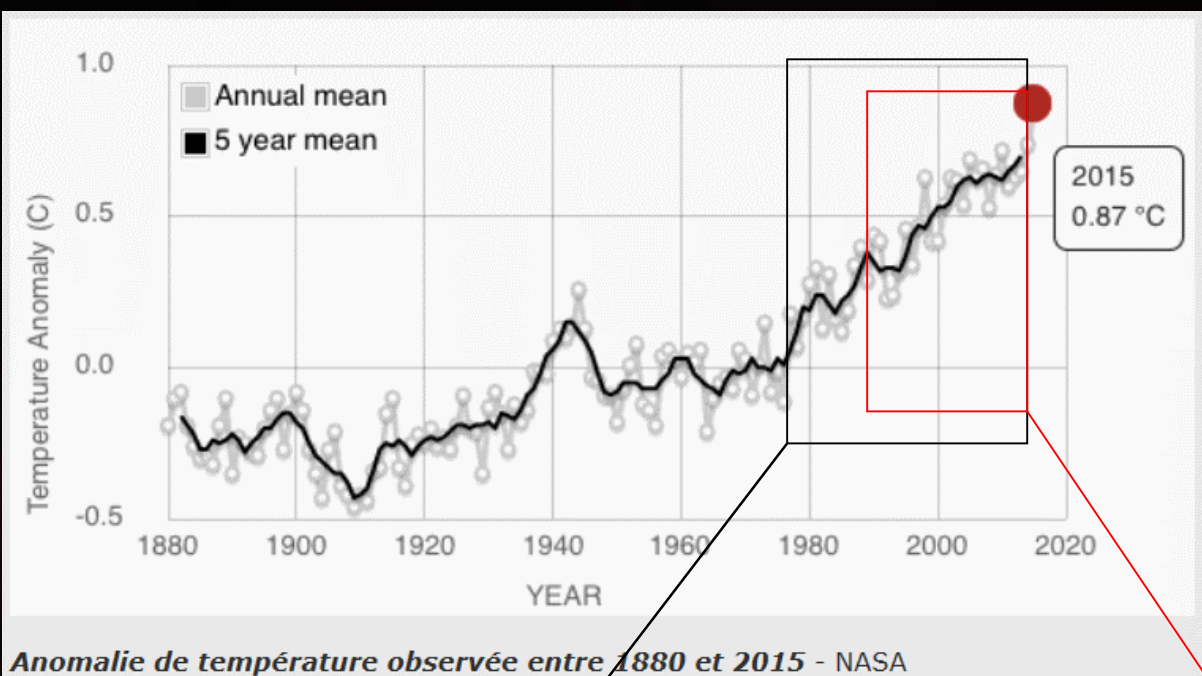


**Variation d'excentricité**  
**T = 100000 ans**



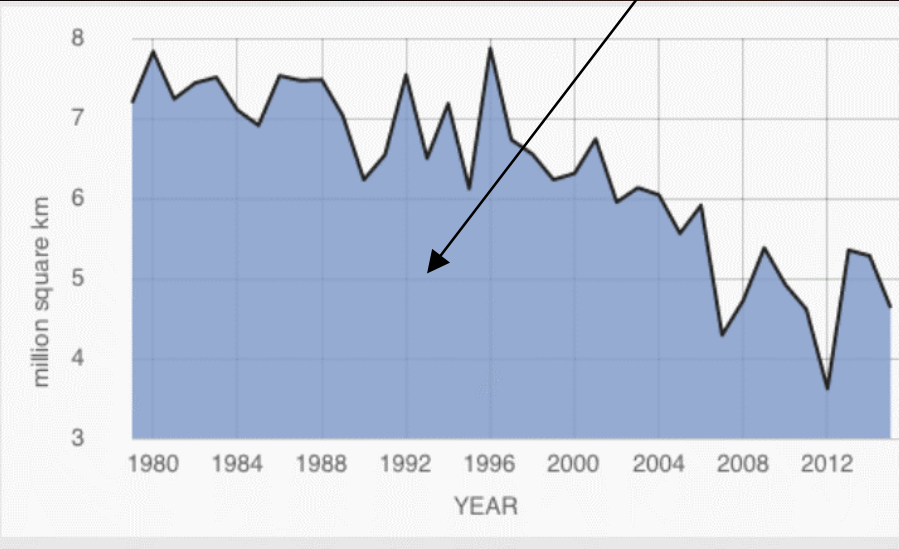
$$e = 0 \rightarrow e = 0.06$$





Anomalie de température observée entre 1880 et 2015 - NASA

Variation récente du climat à l'échelle humaine (centennale) depuis l'ère industrielle; quelle est la part de la variabilité solaire ?



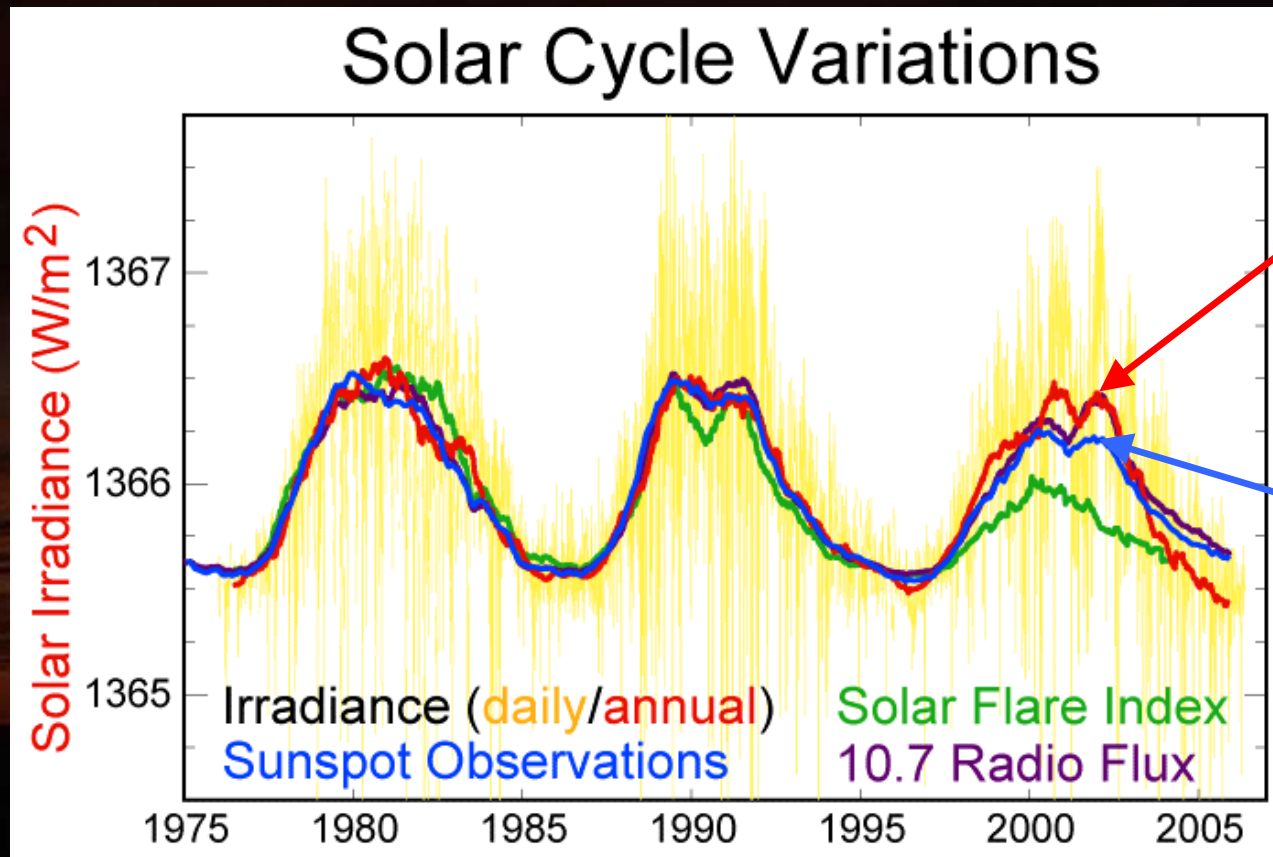
Evolution de la surface glacée de l'Arctique en septembre, entre 1979 et 2015  
NASA



Evolution de la hausse du niveau des océans entre 1993 et 2016 (en millimètres) - NASA

## VARIATIONS COURTES DU CLIMAT

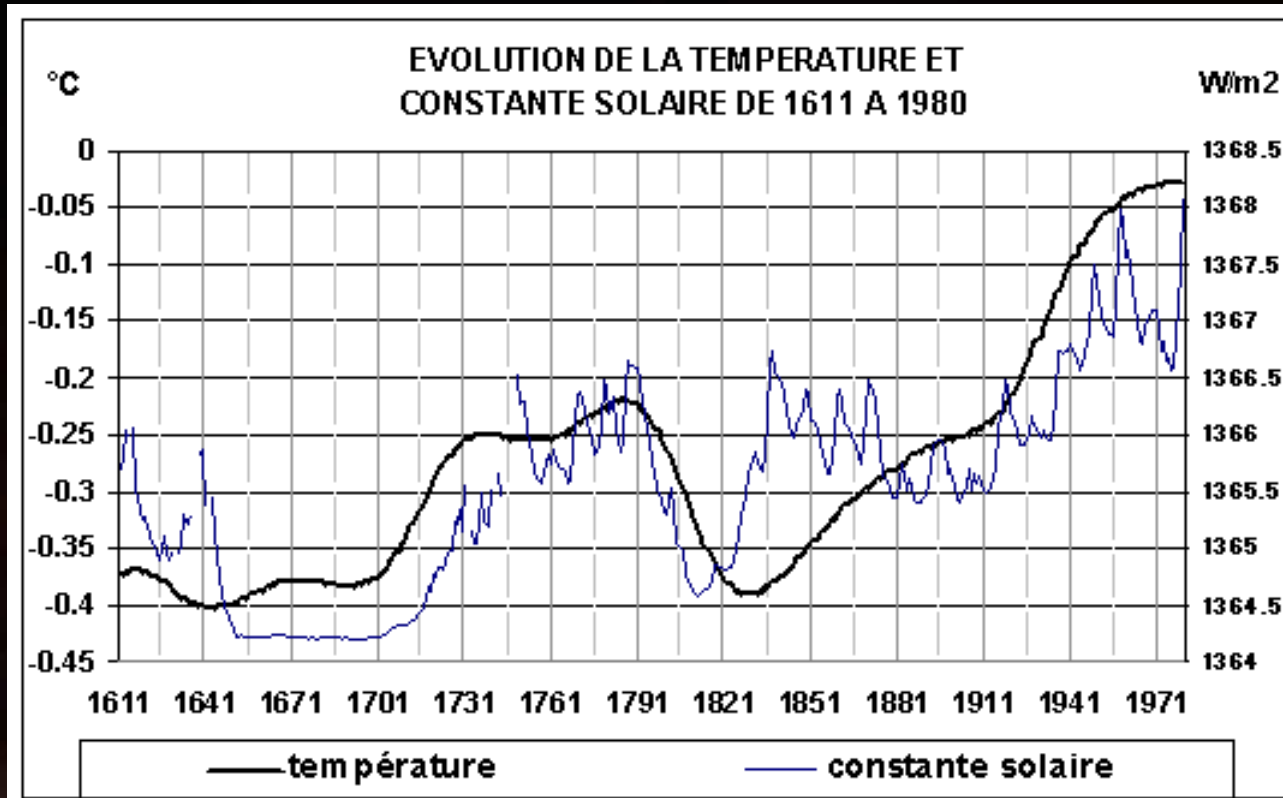
La corrélation entre l'activité solaire et l'irradiance permet de reconstruire la **variation d'irradiance** sur le court terme (100 ou 1000 ans)



**Irradiance**

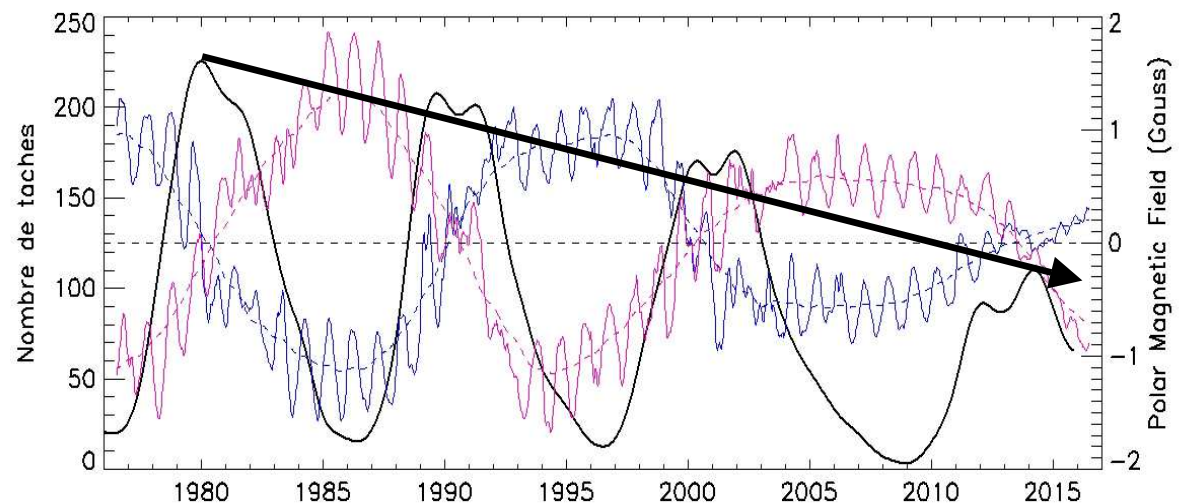
**Activité  
solaire**





Bonne corrélation  
température –  
activité solaire  
jusqu'en 1960. La  
fin du petit âge  
glaciaire (1550-  
1700) coïncide avec  
le Minimum de  
Maunder (1650-  
1700)

Les cycles solaires  
22, 23, 24  
décroissants vont à  
l'encontre d'une  
influence solaire au  
réchauffement actuel

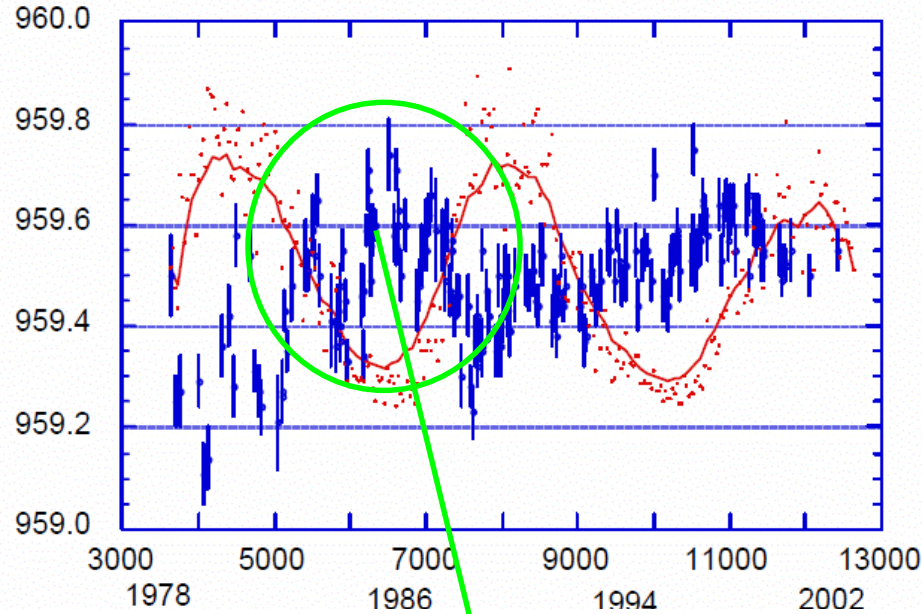


## DEMI-DIAMETRE A CALERN

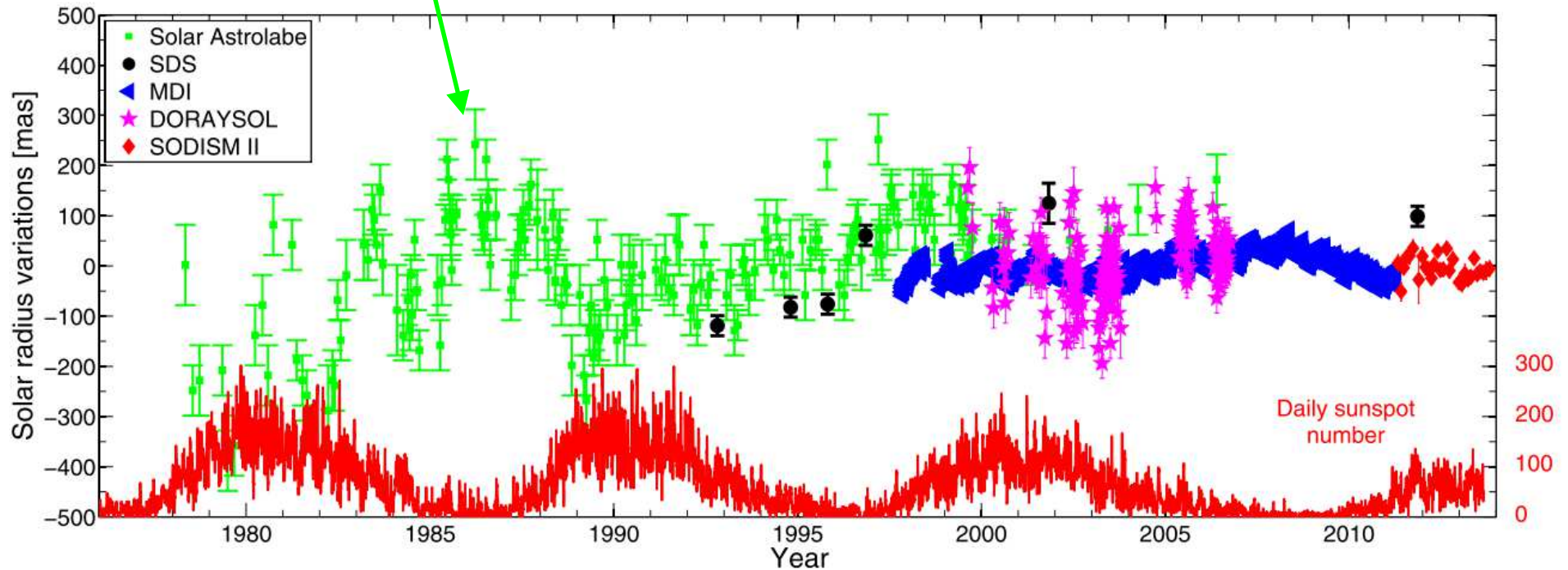
(1978 - 2002)

- RAYON (Groupes de 40 mesures au zénith)

SUNSPOT NUMBERS  
(Echelle arbitraire)



**Le diamètre solaire varie t-il ? Est-il plus gros au minimum solaire ? Quel lien avec la variation d'irradiance solaire et le climat ?**





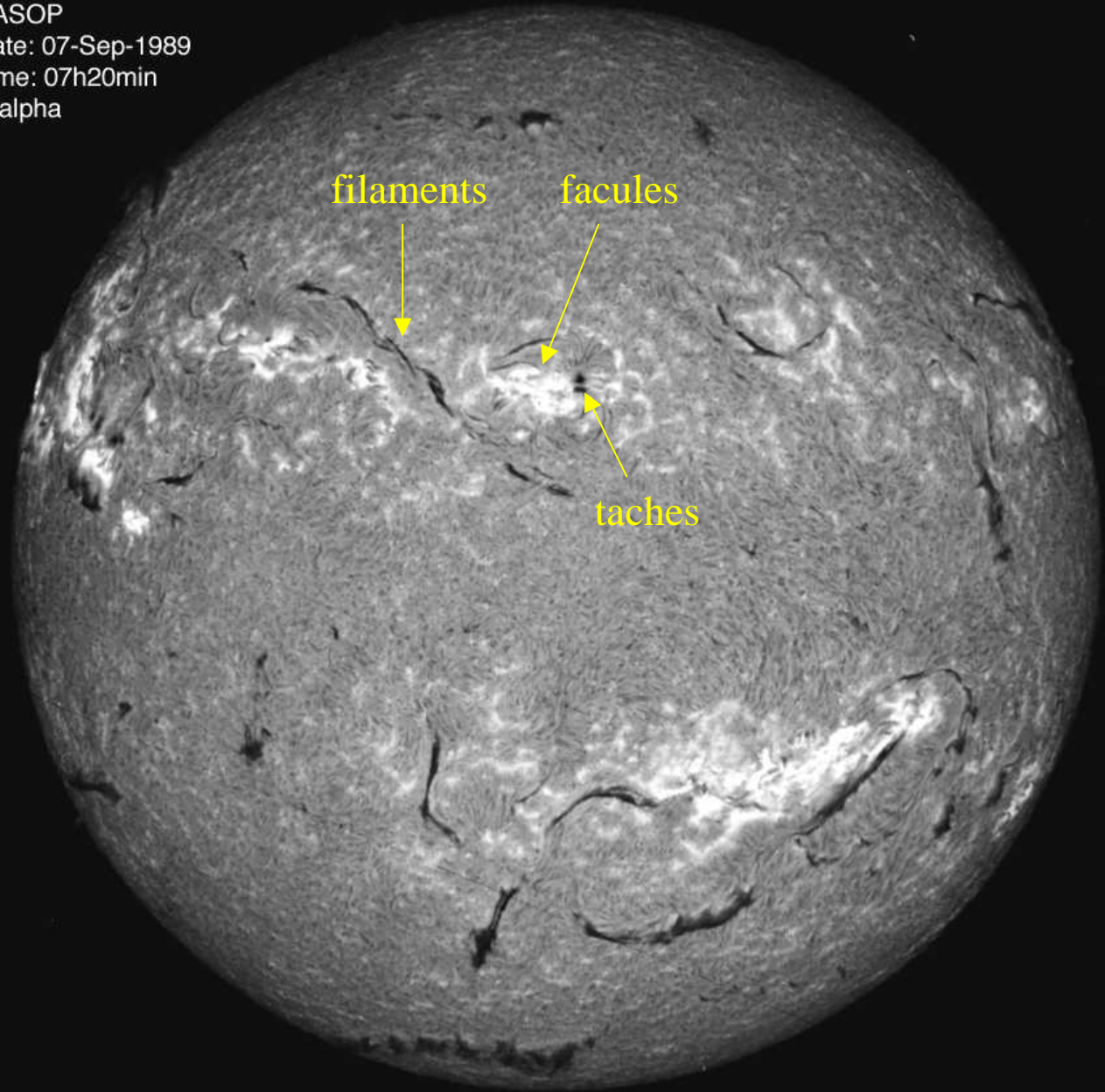


XX<sup>ème</sup> siècle

1909:

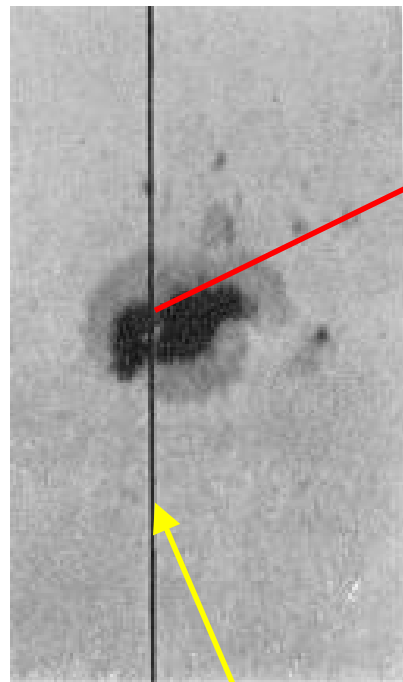
*Henri Deslandres  
(1853-1948) et  
George Hale, USA  
(1868-1938)  
inventent le  
spectro  
héliographe  
permettant de  
produire des  
images mono  
chromatiques  
(bande passante  
0.025 nm)*

PARIS-MEUDON-OBSERVATORY  
DASOP  
Date: 07-Sep-1989  
Time: 07h20min  
H alpha



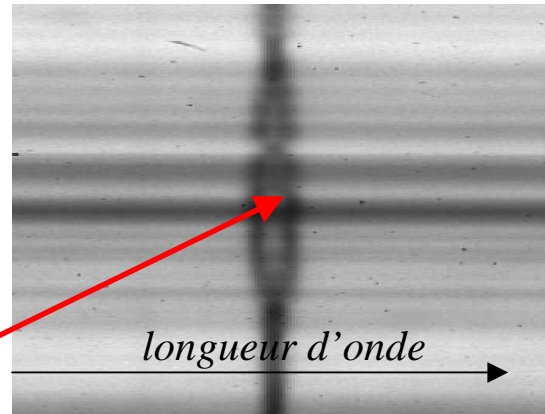


*George Hale (1868-1938) découvre la nature magnétique des taches (1908) et le cycle de 22 ans (1919) en y observant l'effet Zeeman*

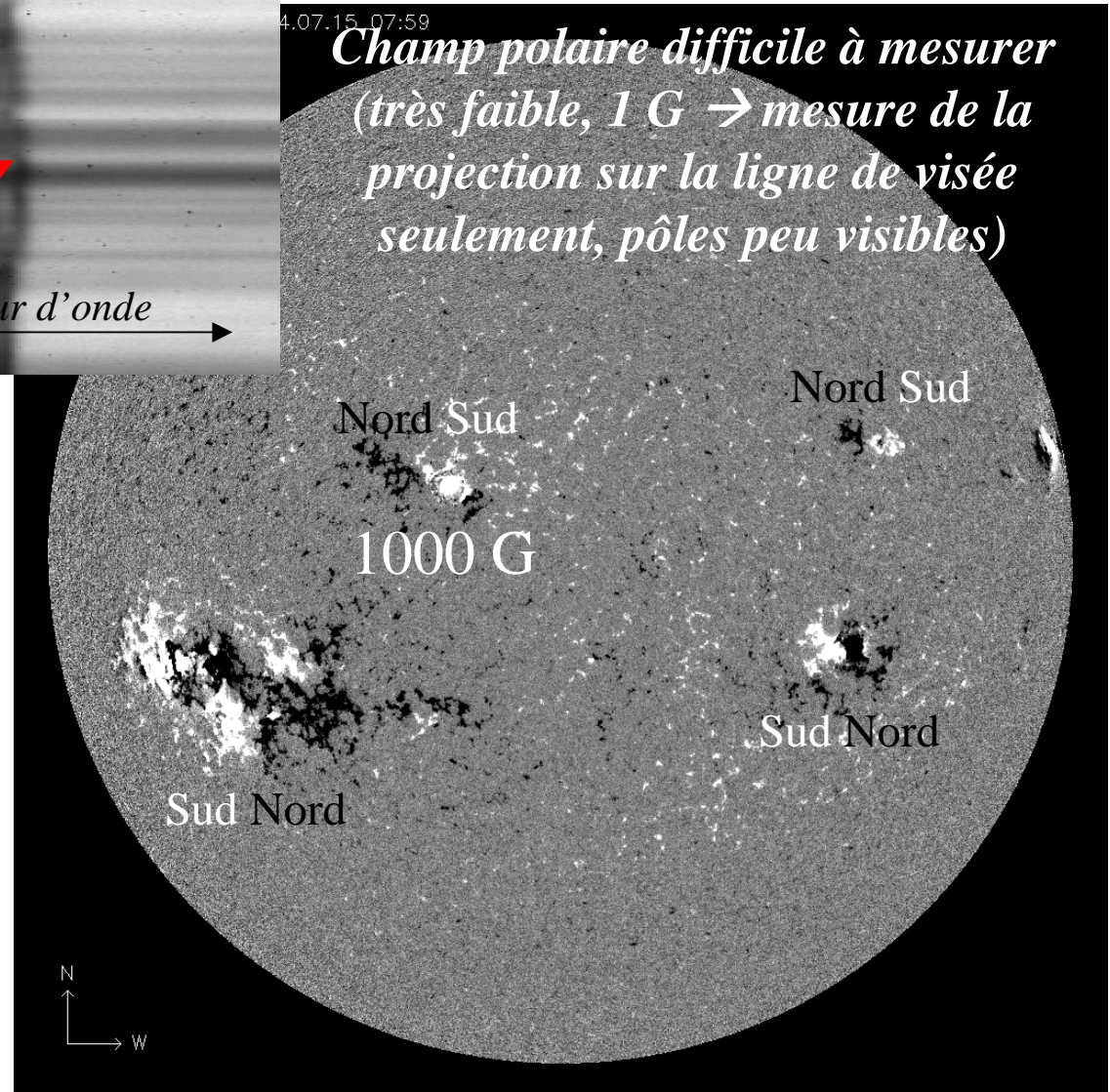


*Fente d'analyse*

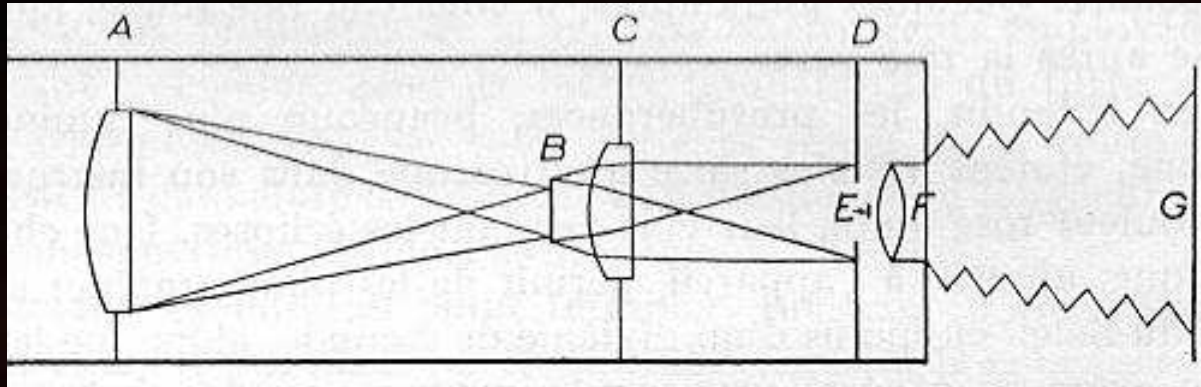
Les raies spectrales se divisent en fonction de l'orientation du vecteur **B**.



*Champ polaire difficile à mesurer (très faible, 1 G → mesure de la projection sur la ligne de visée seulement, pôles peu visibles)*

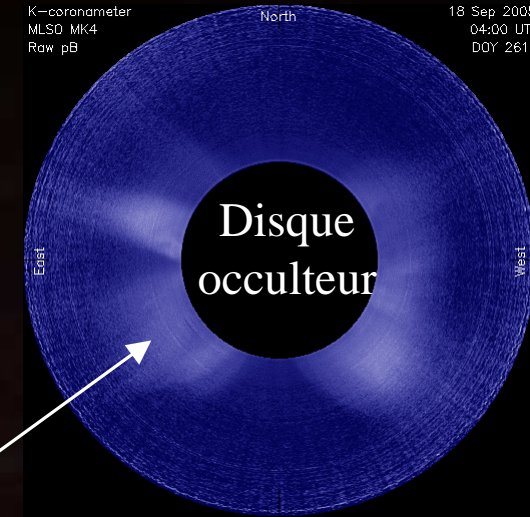


*1931: Bernard Lyot (1868-1938) invente le coronographe qui Permet d'observer la couronne hors éclipse*



K-coronameter  
MLSD MK4  
Raw pB

18 Sep 2005  
04:00 UT  
DOY 261



electrons



*1932: Karl Jansky (1905-1950) découvre le rayonnement radio galactique*

*1942: les sursauts radio de la couronne solaire sont découverts par les radars anglais durant la 2ème guerre mondiale*

*1953: fondation de la station de radioastronomie de Nançay*

*← Le radiohéliographe*



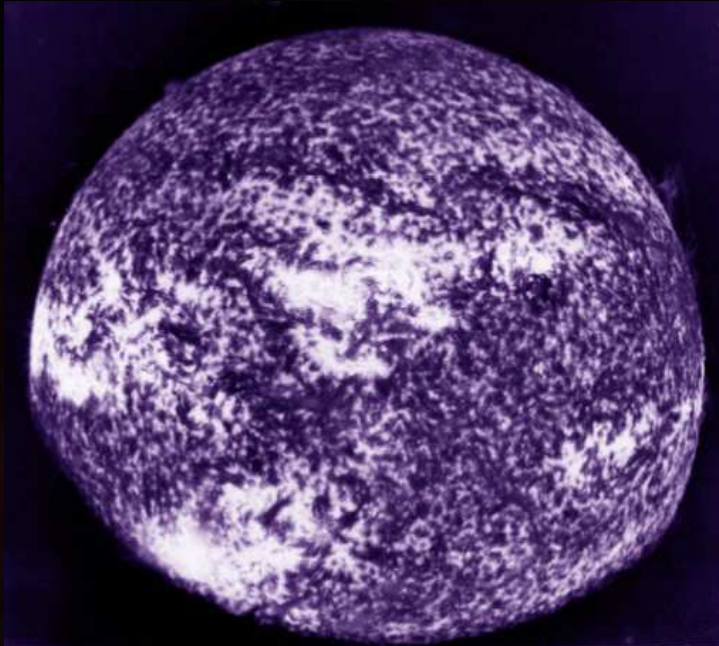


*Télescopes solaires au sol actuellement dans le monde*



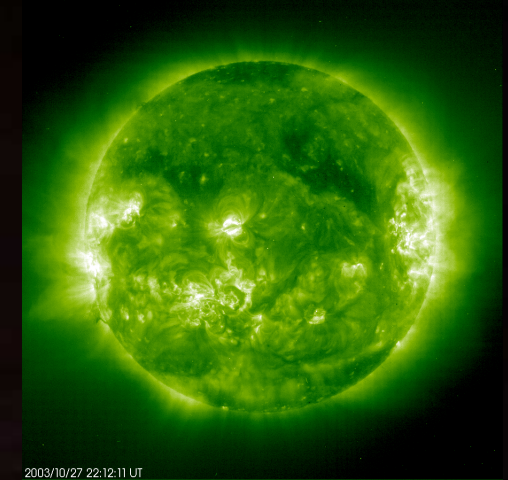
L'ère spatiale à  
partir de 1980





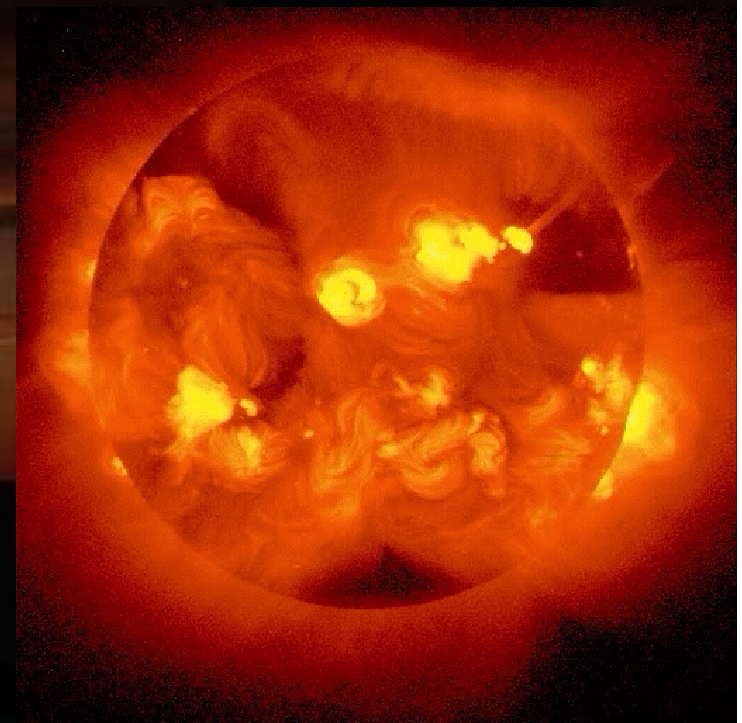
*Seconde moitié du XXème siècle:  
l'ère spatiale, le soleil en UV et X*

*1996-2009: SOHO  
FeXII 19.5 nm (1.4  
10<sup>6</sup>K) →*



*1979: TRC Lyman alpha  
121.6 nm (20000K)*

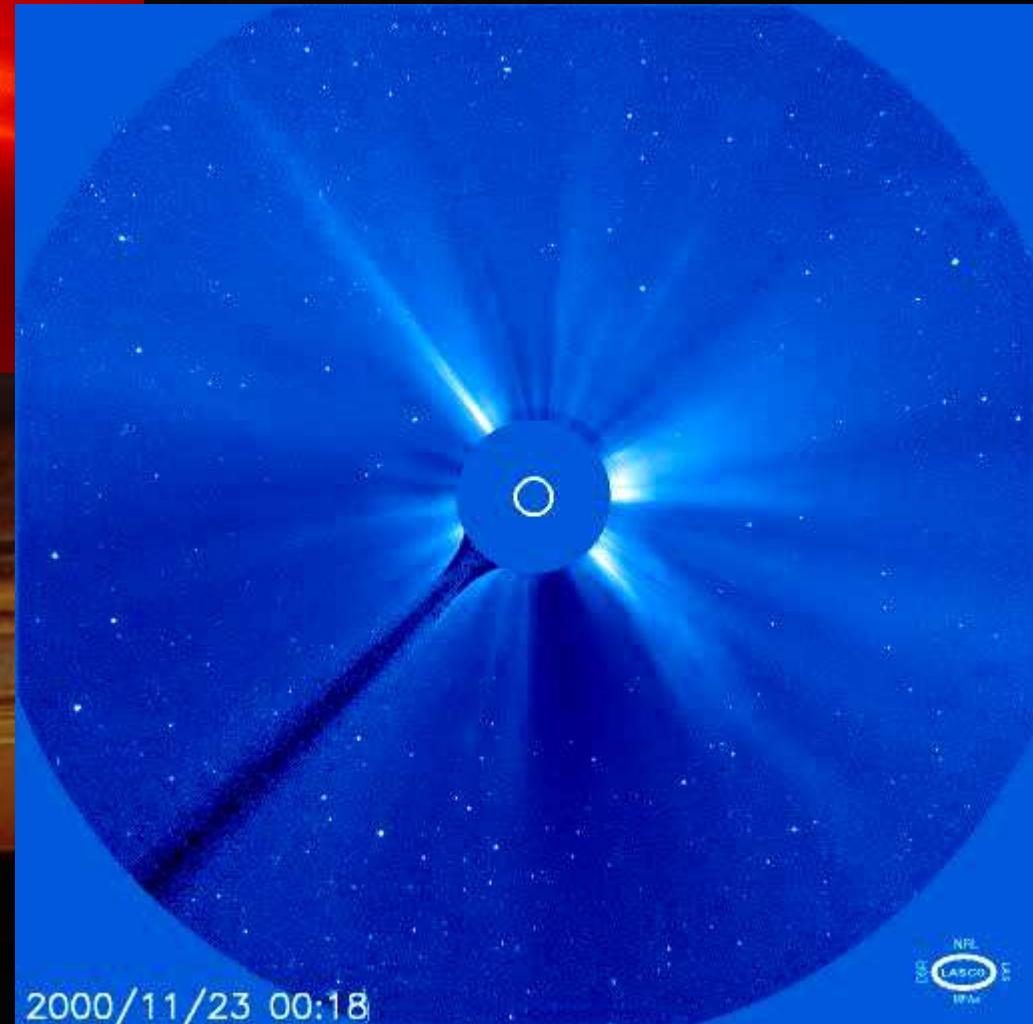
*1991-1999: Solar A (Yohkoh) observe  
le cycle solaire en rayons X →*



*1996: SOHO au point de  
Lagrange L1*

2002/02/20 00:06

*Les éjections de masse  
coronale  
suite à une éruption  
ou à une instabilité d'un  
filament  
(Observation SOHO/ESA-  
NASA, coronographe spatial  
LASCO)*



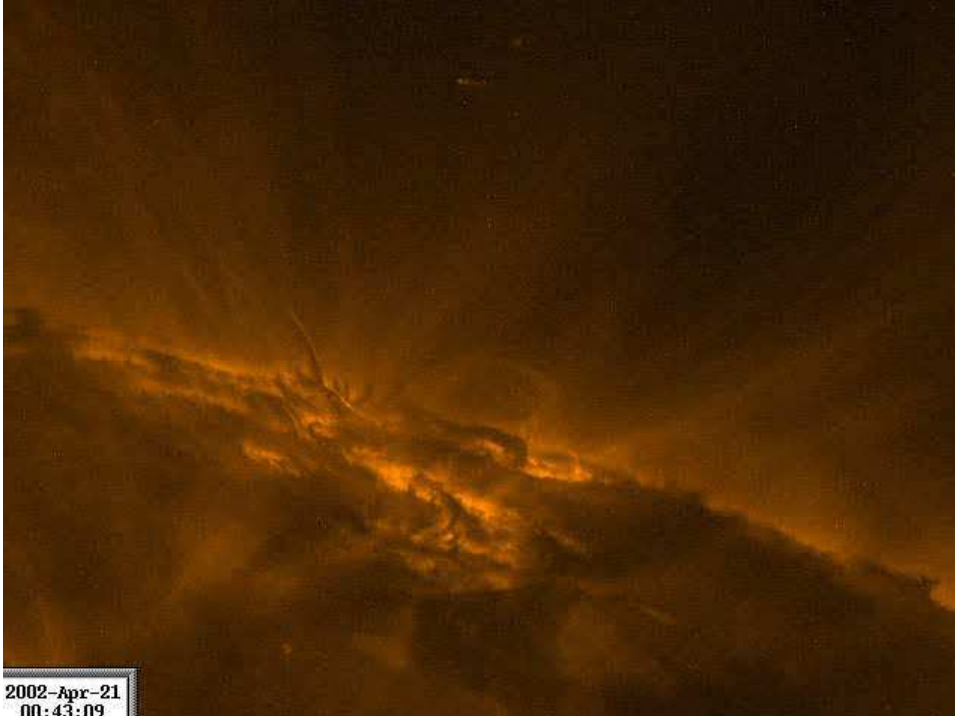
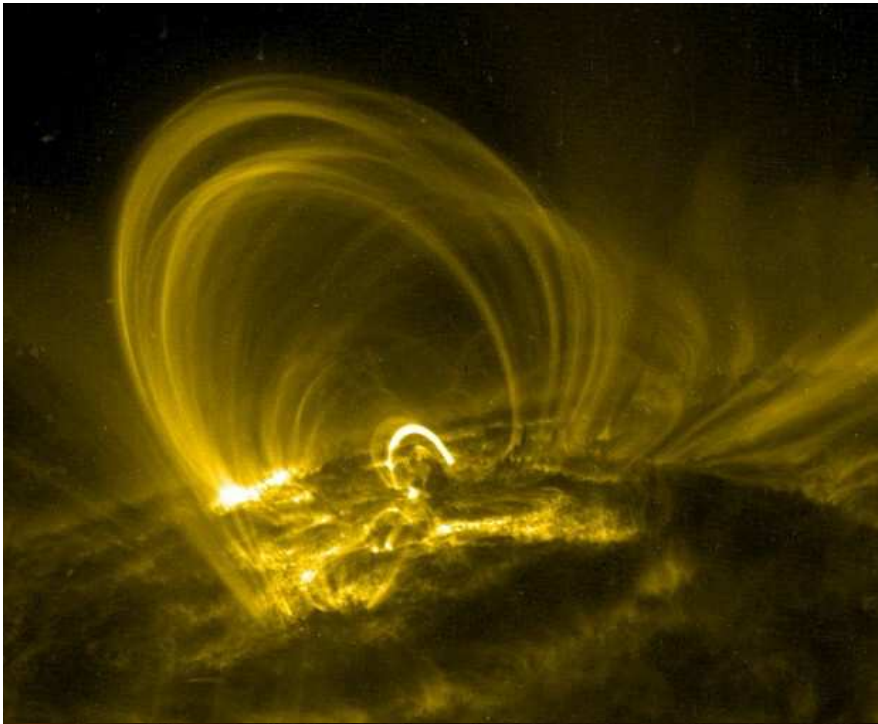
2000/11/23 00:18



Transition Region And Coronal Explorer



*TRACE 1999  
et l'imagerie  
des champs  
magnétiques  
dans la  
couronne*



2002-Apr-21  
00:43:09



*SOLAR DYNAMICS  
OBSERVATORY 2010*

*L'observation de l'activité  
solaire à cadence élevée*

20110210\_1200 AIA 171



*SOLAR DYNAMICS  
OBSERVATORY*

*Essor de la météorologie  
spatiale et de la prévision de  
l'impact de l'activité solaire  
sur la Terre*

20110210\_1158 AIA blos



# *Observatoires du futur (>2020)*

*Sol: Advanced Technology Solar Telescope (USA), European Solar Telescope*

*Espace: Solar Orbiter à 0.3 UA (ESA), Solar C à haute res. 1.50 m 0.1'' (JAXA), Solar Probe dans l'atm. Solaire (NASA)*



European Solar  
Telescope



Solar Orbiter (ESA)

