



## L'activité solaire et l'activité aurorale au XVII<sup>e</sup> siècle

Jean-Pierre LEGRAND

CNRS-INSU, 4, avenue de Neptune,  
94107 Saint-Maur Cedex, France

Maxime LE GOFF

CNRS, Laboratoire de Géomagnétisme,  
4, avenue de Neptune, 94107 Saint-Maur Cedex, France,

Christian MAZAUDIER

CRPE, 4, avenue de Neptune,  
94107 Saint-Maur Cedex, France.

Wilfried SCHRÖDER

Geophysical Station, Hechelstrasse 8,  
2820 Bremen-Roennebeck, Allemagne.

---

*Les taches sombres sur le disque solaire, qui sont parfois visibles à l'œil nu, et les aurores, dont certaines sont descendues vers les tropiques, sont les manifestations les plus immédiatement visibles de l'activité solaire. On sait depuis plus d'un siècle que cette activité se déroule suivant un cycle de périodicité assez régulière, voisine de onze ans, mais dont l'intensité, mesurable en nombre de taches, est assez variable pour qu'on puisse parler de « petits » et « grands » cycles d'activité solaires. Nous traversons actuellement une série de grands cycles. A la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, en revanche, cette activité a été incomparablement plus faible pendant plusieurs décennies, à l'époque où l'astronomie instrumentale prenait son essor en Europe. Cette période de faible intensité, qui a attiré l'attention de l'astronome allemand Spoerer dès 1890, est connue sous le nom de « minimum de Maunder ». Que sait-on exactement de cette époque? Les instruments utilisés étaient-ils assez précis? Le climat que l'on sait nuageux a-t-il eu raison de l'assiduité des astronomes? Que peut apporter l'analyse de données encore*

*plus anciennes, datant du début du xvii<sup>e</sup> siècle, au moment de l'invention de la lunette astronomique? Cet article fait le point sur toutes ces questions historiques, et éclaire les documents originaux de savants prestigieux à la lumière des plus récentes connaissances sur le fonctionnement de notre étoile.*

---

### ***Le minimum de... Spoerer***

« Il y a juste trente-deux ans que le professeur Spoerer [de l'observatoire de Postdam], le vétéran des observateurs des taches solaires, publiait deux articles importants au sujet du cycle solaire, dans lesquels il attirait l'attention [des astronomes] en mettant en évidence une période d'affaiblissement prolongé de l'activité solaire, commençant au milieu du xvii<sup>e</sup> siècle. Il avait alors été de mon devoir de présenter une courte note sur ces deux articles au Conseil de la Royal Astronomical Society pour son rapport annuel de l'année 1890, et, quatre ans plus tard, je fournissais un compte rendu complet du premier article, dans "Knowledge", le 1<sup>er</sup> août 1894 (p. 173). »

« Il m'apparaît que cette découverte de Spoerer n'a pas reçu toute l'attention qu'elle méritait, et je voudrais que l'Association me permette de résumer les faits principaux. »

C'est en ces termes que l'astronome anglais Maunder introduisait son article « The prolonged Sunspot minimum, 1645-1715 », publié en 1922 par le *British Astronomical Association Journal*, dans lequel il donnait une description des taches solaires et des aurores observées à cette époque, montrant ainsi la réalité de cette période de faible activité solaire.

Puis, en 1976, Eddy publiait un nouvel article sur ce sujet confirmant la thèse du minimum prolongé. Curieusement, il intitulait son article « The Maunder Minimum » alors que cette découverte appartient à Spoerer au dire même de l'astronome anglais.

A la suite de l'article de Eddy, plusieurs critiques furent publiées notamment par Gleissberg et Damboldt (1979), Kopecky et Kuklin (1987), Landsberg (1980), Link (1978), Schröder (1988), Zhen-Tao (1982). Certains de ces auteurs démontrèrent que l'activité de taches, bien que faible durant cette période, avait toujours varié selon le cycle bien connu de onze ans et que, par conséquent, il n'y avait pas eu de minimum de taches prolongé. La fréquence d'apparition des aurores au xvii<sup>e</sup> siècle fut en particulier utilisée pour ces études.

Mais en ces temps où l'astronomie instrumentale balbutiait, les observations de taches solaires et d'aurores sont évidemment loin de présenter une bonne homogénéité, ce qui ne facilite pas leur interprétation en terme de niveau d'activité.

Dans la présente étude, pratiquement toutes les observations disponibles ont été recueillies et discutées pour en déterminer la fiabilité et surtout l'exhaustivité.

Puis une synthèse détaillée, faite à la lumière des progrès réalisés dans la reconnaissance des sources solaires de l'activité géomagnétique (Legrand et Simon, 1989; Simon et

Legrand, 1989), montrera la réalité des bouleversements qui sont intervenus dans le fonctionnement de la « machine solaire » précisément pendant le règne du Roi Soleil !

### *L'activité tachée du Soleil au XVII<sup>e</sup> siècle*

Les données solaires dont on dispose pour le XVII<sup>e</sup> siècle, pendant lequel l'astronomie de précision a pris son essor, peuvent être classées en trois périodes dont nous retracerons l'histoire :

- la période de découverte de l'activité tachée à l'aide de la lunette astronomique (1610-1645);
- la période « d'incertitude » (1646-1670);
- la période de faible activité (1671-1710).

### *La découverte de l'activité tachée du Soleil et l'invention de la lunette astronomique (1610-1645)*

#### *Historique*

L'usage des lentilles pour voir plus distinctement les objets éloignés apparut en Italie entre 1580 et 1586, et aux Pays-Bas en 1608 (Danjon et Couder, 1935).

Les premières lunettes d'approche construites à cette époque, comportant un objectif convexe et un oculaire concave, l'ont été par des artisans habiles : lunetiers, miroitiers ou mécaniciens. Ces instruments furent longtemps très rares car il n'était pas facile d'acquérir une technique dont les secrets étaient jalousement gardés. Mais cette invention était trop brillante pour rester longtemps confinée entre les mains de quelques constructeurs. Elle ne tarda pas à se répandre de toutes parts et les savants ne furent pas les derniers à s'y intéresser, en particulier le célèbre florentin Galilée.

C'est par son correspondant à Paris, Jacques Badouère, que Galilée entendit parler pour la première fois de ces « lunettes hollandaises » en juin 1609. Ces instruments venaient de faire leur apparition chez les marchands de la capitale française (Danjon et Couder, 1935). C'est ce que relate Pierre de l'Estoile, dans son Journal du règne d'Henry IV, à l'année 1609 : « Le jeudi 30 d'avril, sur le pont Marchand, je me suis arrêté chez un lunetier qui montroit à plusieurs personnes des lunettes d'une nouvelle invention et usage. Ces lunettes sont composées d'un tuyau long d'environ un pied; à chaque bout il y a un verre, mais différens l'un de l'autre; elles servent pour voir les objets éloignés, qu'on ne voit que très confusément : on approche cette lunette d'un oeil et on ferme l'autre; et regardant l'objet qu'on veut connoître, il paroît s'approcher et on le voit distinctement, en sorte qu'on reconnoît une personne à une demi-lieuë. On m'a dit qu'on en devoit l'invention à un lunetier de Midelbourg en Zélande, et que l'année dernière il en avoit fait présent de deux au prince Maurice, avec lesquelles on voyoit très clairement les objets éloignés, de trois ou quatre lieuës. Ce prince les envoya au Conseil des Provinces-Unies, qui en récompense donna à l'inventeur trois cents écus, à condition qu'il n'apprendroit à personne la manière d'en faire de semblables. »

Il est presque certain que Galilée n'eût jamais une telle lunette en main, mais, à l'aide de la théorie de la réfraction, il découvrit rapidement la composition de la « lunette d'approche ». Dès juillet 1609, il en entreprit la construction en garnissant les extrémités d'un long tuyau avec deux verres, l'un convexe – l'objectif – l'autre concave – l'oculaire – et il constata qu'un objet observé était agrandi trois fois.

Il construisit d'autres lunettes dont trois exemplaires sont au Musée de l'Histoire de la Science à Florence. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

Diamètre de l'objectif (cm)	Diamètre utile (cm)	Distance focale (cm)	Grossissement
51,	2,6	132,7	14
3,7	1,6	92	20
3,8	Objectif en partie brisé	169	20

C'est pour obtenir une meilleure définition de l'image que Galilée diaphragmait ses objectifs. Le pouvoir de résolution de ces lunettes était de 10 à 15'' avec un champ de vision d'environ un demi-diamètre solaire (15') (King, 1979). C'est au moyen de ces instruments qu'il découvrit les satellites de Jupiter le 7 janvier 1610, les phases des planètes, les montagnes lunaires, les étoiles de la Voie Lactée, les nébuleuses et les taches solaires. La lunette d'approche ainsi décrite fut assez longtemps la seule en usage. Elle avait l'inconvénient d'avoir un champ de vision restreint.

Ensuite, Kepler montra dans sa *Dioptrique* publiée en 1611, qu'on pouvait remplacer l'oculaire divergent de cette lunette par un oculaire convergent. Il est donc l'inventeur de la lunette astronomique dont le Père Scheiner, Jésuite à Ingolstadt, fut le premier à se servir.

Cette substitution permit d'augmenter de manière appréciable le champ de vision et d'introduire des réticules ainsi que des micromètres dans les lunettes.

Si Galilée semble être le premier à avoir observé les taches solaires avec une lunette, c'est Fabricius, jeune hollandais étudiant en médecine qui, le premier, publia un ouvrage intitulé « Joh. Fabricii *Physiæ de maculis in sole observatis et apparate earum cum sole conversione narratio*. Wittebergæ, 1611 petit in 4° ». Dans cet ouvrage, de quarante-trois pages, dont l'épître dédicatoire est datée du 13 juin 1611, huit pages seulement concernent les taches du Soleil.

Lalande (1778) a traduit ainsi tout ce que Fabricius dit sur ce sujet :

« Après que les lunettes ont été découvertes en Hollande, on a commencé à regarder la Lune, ensuite Jupiter et Saturne, et Galilée y a trouvé des choses singulières : pour moi, poussé par la même curiosité, je m'occupais à regarder le Soleil, dont les bords me paraissaient avoir des inégalités remarquables que mon père David Fabricius avait déjà remarquées, comme je l'ai appris par ses lettres dans le temps que je m'en occupais. J'aperçus (le 9 mars 1611) une tache noirâtre sur le Soleil, plus rare et plus pâle d'un côté, assez grande par rapport au disque du Soleil; je crus d'abord que c'était un nuage; mais l'ayant regardé dix fois avec différentes lunettes, et ayant appelé mon père pour la lui faire voir, nous fûmes assurés que ce n'était point un nuage; le Soleil s'élevant de plus en plus nous ne pouvions plus le regarder, d'autant que lors même qu'il est à

l'horizon, il affecte les yeux de manière que, pendant plus de deux jours la vue des objets est altérée : c'est pourquoi j'avertis ceux qui voudraient faire de pareilles observations, de commencer à recevoir la lumière d'une petite portion du Soleil afin que l'œil s'y accoutume et parvienne peu à peu à supporter la lumière du disque entier du Soleil. Nous passâmes le reste de la journée et la nuit suivante avec une extrême impatience et en rêvant sur ce que pouvait être cette tache : si elle est dans le Soleil, je la reverrai sans doute; si elle n'est pas dans le Soleil, son mouvement nous la rendra invisible. Enfin je la revis dès le matin avec un plaisir incroyable, mais nous vîmes qu'elle avait un peu changé de place, ce qui augmenta notre incertitude : cependant nous imaginâmes de recevoir les rayons du Soleil par un petit trou dans une chambre obscure et sur un papier blanc et nous y vîmes très bien cette tache en forme de nuage allongé; le mauvais temps nous empêcha de continuer ces observations pendant trois jours. Au bout de ce temps-là nous vîmes la tache qui était avancée obliquement vers l'occident; nous en vîmes une autre plus petite vers le bord du Soleil qui, dans l'espace de peu de jours, parvint jusqu'au milieu; enfin il en survint une troisième; ensuite la première disparut et les autres quelques jours après. Je flottais entre l'espérance et la crainte de ne pas les revoir; mais dix jours après, la première reparut à l'orient : je compris alors qu'elle faisait une révolution et, depuis le commencement de l'année, je me suis confirmé dans cette idée et je les ai fait voir à d'autres qui en sont persuadés. Cependant j'avais un doute qui m'empêcha d'abord d'écrire à ce sujet et qui me faisait même repentir du temps que j'avais employé à cette observation : je voyais que ces taches ne conservaient pas entr'elles les mêmes distances, qu'elles changeaient de forme et de vitesse; mais j'eus d'autant plus de plaisir lorsque j'en eus senti la raison. Comme il est vraisemblable par ces observations, que les taches sont sur le corps même du Soleil, qui est sphérique et solide, elles doivent devenir plus petites et ralentir leur mouvement sur les bords : nous invitons les amateurs des vérités physiques à profiter de l'ébauche que nous leur présentons; ils soupçonneront sans doute que le Soleil a un mouvement de conversion, comme l'a dit Jordanus Bruno et, en dernier lieu Kepler dans son livre sur les mouvements de Mars car, sans cela, je ne sais ce que nous ferions de ces taches. Je ne suis pas de l'avis que ce soit des nuages; je ne suis pas non plus de l'avis de ceux qui ont placé les comètes dans le Soleil, comme des émissaires destinés à y revenir bientôt; j'aime mieux me taire sur tout cela que de parler au hasard; je suis même tenté de regarder ce mouvement du Soleil comme la cause des autres mouvements célestes, suivant ces paroles d'Aristote, qui dit dans ses poèmes "que le Soleil est le père et l'auteur des mouvements" ».

Les connaissances de l'enthousiaste Fabricius sur les taches solaires ne pouvaient être que très rudimentaires. Galilée et le Père Scheiner purent, par leurs nombreuses observations donner plus de précisions sur la nature et le mouvement de ces taches. L'un et l'autre s'attribuaient d'ailleurs la primeur de la découverte! Galilée, dans son *Discours sur la Comète* de 1618, dans son *Saggiatore ou Trutinatore* et dans ses *Dialogues du système du Monde*, a toujours soutenu qu'il était le premier à avoir vu en juillet-août 1610 les taches du Soleil et que le Père Scheiner n'avait commencé à les observer qu'après avoir vu ses écrits. Ce que réfute évidemment ce dernier dans son ouvrage *Rosa Ursina* (1630).

Quoi qu'il en fut, Galilée dans son livre *Istoria dimostragion interno alle macchine solari*, (Rome 1613), où il parle pour la première fois des taches solaires, montre qu'elles se situent sur la surface du Soleil, qu'il y en a quelquefois beaucoup, quelquefois peu ou

pas du tout, que le Soleil en tournant les ramène à notre vue, qu'il y en a qui durent un ou deux jours, d'autres plus d'une rotation solaire, qu'elles se condensent ou se divisent, qu'elles décrivent des cercles parallèles entre eux et qu'elles ne s'écartent pas de plus de  $30^\circ$  de l'équateur. Galilée y parle aussi des pôles de rotation du Soleil, mais il n'avait pas remarqué l'inclinaison de  $7^\circ$  que présente l'équateur solaire sur le plan de l'écliptique.

« Dès lors, il ne manquait à la théorie des taches solaires qu'une suite d'observations détaillées pour confirmer la rotation du Soleil et préciser la situation de son équateur » (Lalande, 1778). C'est ce que fit le Père Scheiner qui publia les résultats de ses deux mille observations faites durant 18 ans dans *Rosa Ursina* (1630). « Si Galilée est le premier qui ait raisonné avec justesse sur la nature et le mouvement des taches, le Père Scheiner est celui qui les a plus observées et qui a le mieux étudié leurs mouvements » (Lalande, 1778). Il pourvut dans ce but sa ou ses lunettes d'un dispositif de projection et d'une monture équatoriale de l'invention d'un de ses confrères, le Père Gruenberger (*fig. 1*).

Le mathématicien et astronome anglais Thomas Harriot (1560-1621) observa aussi les taches solaires du 8 décembre 1610 au 18 janvier 1613. Dans ses manuscrits retrouvés à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle dans un château du Comté de Sussex, il y avait deux cents dessins de la surface solaire dont les copies furent envoyées à Wolf par Carrington en 1857. Harriot est le seul astronome de cette époque qui détermina avec précision la durée de la rotation synodique solaire. La valeur moyenne de ses mesures est de 27,154 jours pour les deux années d'observations (Shirley, 1974).

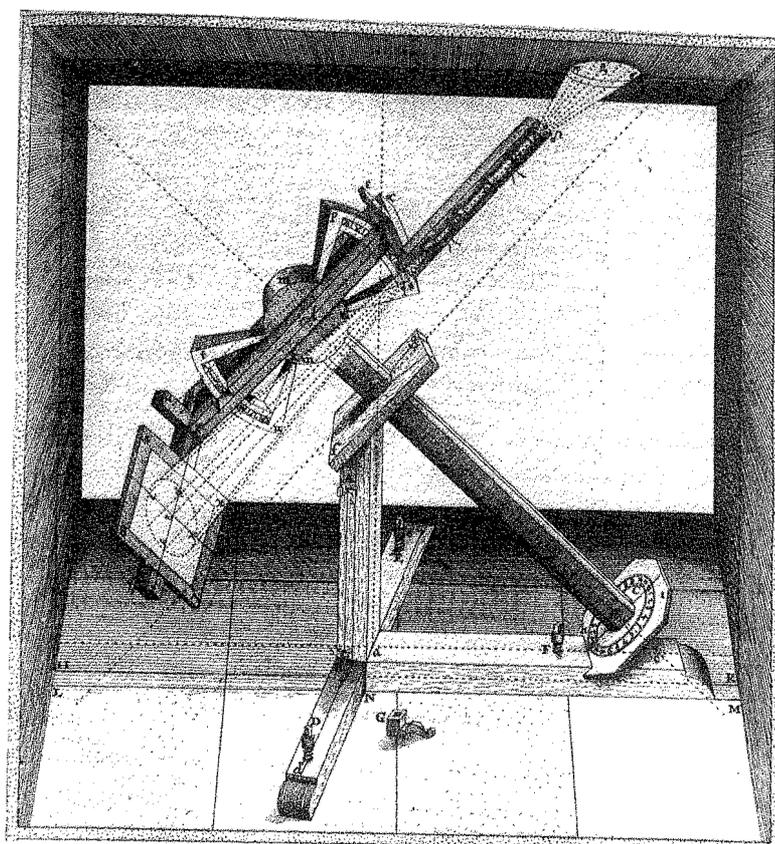


Fig. 1 (ci-contre et page opposée). — Si le Père Scheiner employait des écrans colorés pour observer le Soleil, il utilisait aussi un système de projection avec ou sans monture équatoriale (*Rosa Ursina*, 1630).

Enfin, toujours pour le début du XVII<sup>e</sup> siècle, nous citerons pour mémoire les observations solaires de Tarde, chanoine de Sarlat, faites pendant cinq années consécutives de 1615 à 1620 toutes les fois que la sérénité du ciel le permettait. Pour cet ecclésiastique dévôt, les taches ne pouvaient-être que des petites planètes dont les révolutions étaient proches du Soleil ainsi qu'il l'explique : « Nous avons entrepris de dire ici quelque chose... plutôt pour ce que nous avons vu plusieurs Italiens ou Allemands, lesquels après avoir vu ces phénomènes ont dit et maintenu (quoique d'esprit et de mérite en la philosophie et l'astrologie) que c'était des taches inhérentes au corps du Soleil, imposant par ce moyen au père de lumière, comme si l'œil du monde était malade d'une ophtalmie. Or on ne peut supporter que le Soleil soit ainsi honny et injurié, nous avons entrepris sa protection et d'essayer de montrer ici que ce ne soit point des taches, ni des cavités, ni autres marques de quelque défautuosité, ni des nuées voltigeantes auprès du Soleil : mais que ce sont des planètes qui ont leurs mouvements à l'entour du Soleil lesquels nous avons nommé les astres de Borbon, du nom du très chrétien Roi de France Louis de Borbon... J'ai demeuré longtemps perplexe et ai gardé ce traité trois ans entiers, sans permettre qu'il voit le jour, considérant combien c'est chose ardue et hasardeuse de produire au public quelque chose de nouveau... » Quelques unes de ses observations ont été publiées en 1622, notamment celles du 25 août 1615 où il vit trente taches sur le disque solaire.

Les seules autres observations connues de taches solaires faites vers le milieu du XVII<sup>e</sup> siècle sont celles de l'astronome polonais Hevelius à Dantzic entre 1642 et 1644. Le

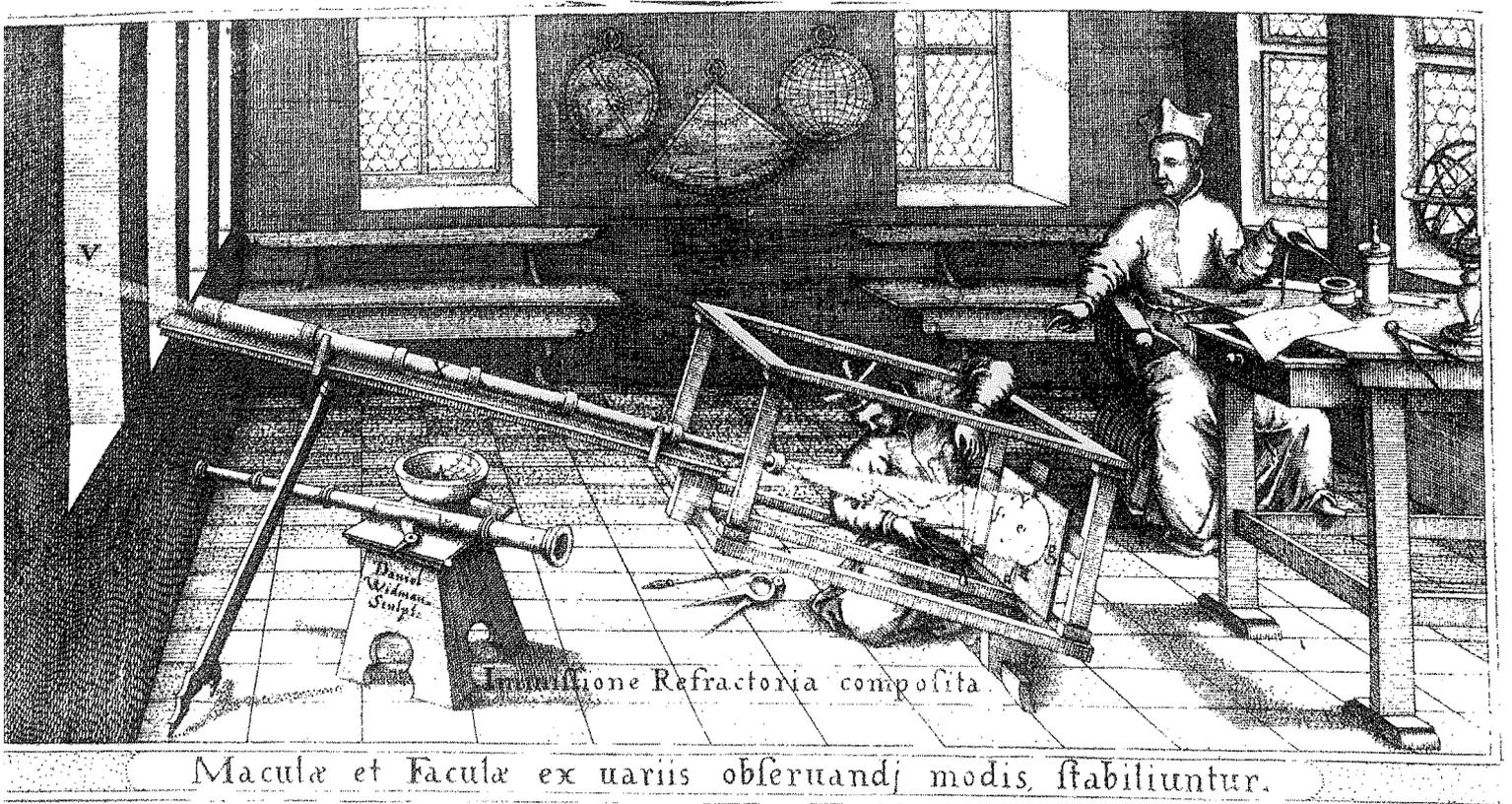




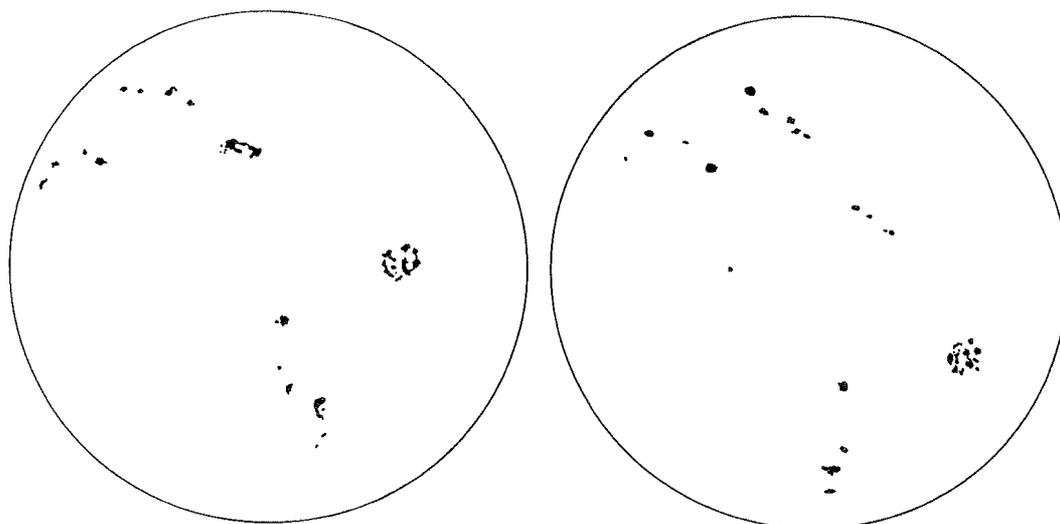
Fig. 2. – *Hévélius observant le Soleil* par projection sur un écran de carton. Il disposait une lunette au travers d'une boule de bois insérée dans une ouverture circulaire pratiquée dans une persienne (*Machinae coelestis*, 1673).

dispositif qu'il utilisait est celui présenté sur la figure 2. Ces observations furent publiées dans son ouvrage *Selenographia*, en 1647.

### Résultats

Des premières observations du Soleil réalisées avec une lunette au début du xvii<sup>e</sup> siècle il est possible d'estimer le niveau de l'activité tachée qui s'est développée à cette époque.

Galilée, dans son ouvrage publié en 1613, présente plusieurs dessins du disque solaire avec le nombre de taches observées au cours des mois de juin et juillet 1612 (*fig. 3*). Sakurai (1980) a analysé ces dessins et a calculé pour chaque jour de cette époque, le nombre relatif de Wolf  $R$  (<sup>1</sup>). Il trouva des valeurs quotidiennes de  $R$  comprises entre 60 et 153. Pour 38 jours d'observations, la moyenne de  $R$  atteint 99, chiffre qui correspond à une activité relativement importante. Et cette moyenne est une valeur minimale si on



---

Fig. 3. — *Les taches solaires* observées le 5 juillet (à gauche) et le 6 juillet 1612 (à droite) par Galilée (Galileo 1613).

---

admet que des petites taches ont pu échapper à l'observation de Galilée. L'analyse de la distribution de ces taches (entre  $\pm 30^\circ$  et  $\pm 5^\circ$ ) ainsi que leur structure indiquent que Galilée a fait ses observations durant la phase du maximum d'un cycle.

Lalande, pour étudier avec précision la durée de la rotation du Soleil, reprit en 1776 les séries d'observations faites par le Père Scheiner entre 1624 et 1627 et celles faites par Hévelius entre 1642 et 1644. Il put ainsi estimer graphiquement sur les dessins précis publiés par ces deux astronomes (*fig. 4*), la position de 176 taches et déterminer la date de leur passage au méridien central du Soleil.

Le Père Scheiner comme Hévelius ayant surtout exécuté des dessins de passages de taches sur le disque solaire et rarement l'aspect du disque solaire un jour donné, il paraît difficile d'estimer le nombre relatif de Wolf pour ces deux périodes. Pour comparaison avec l'activité de taches survenue à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle nous avons calculé les moyennes annuelles des passages observés. Entre le 18 décembre 1624 et le 28 novembre 1627, le Père Scheiner observa 123 passages de taches soit 41 passages par an. La distribution en latitude de ces taches se situait entre  $\pm 24^\circ$  et  $0^\circ$ . Dans l'ouvrage d'Hévelius (1647) on trouve 49 passages de taches entre le 2 novembre 1642 et le 9 octobre 1644 soit 25 passages par an avec une répartition en latitude comprise entre  $\pm 18^\circ$  et  $0^\circ$ . Nous savons maintenant que ces deux distributions en latitudes correspondent à celles survenant durant les phases de décroissance des cycles de taches.

Par ailleurs, nous avons recherché pour ces 176 passages de taches, s'il existait des longitudes solaires privilégiées de leur apparition en calculant pour chacune d'elles leurs coordonnées Carrington (<sup>2</sup>). La figure 5 montre la courbe des fréquences calculée par

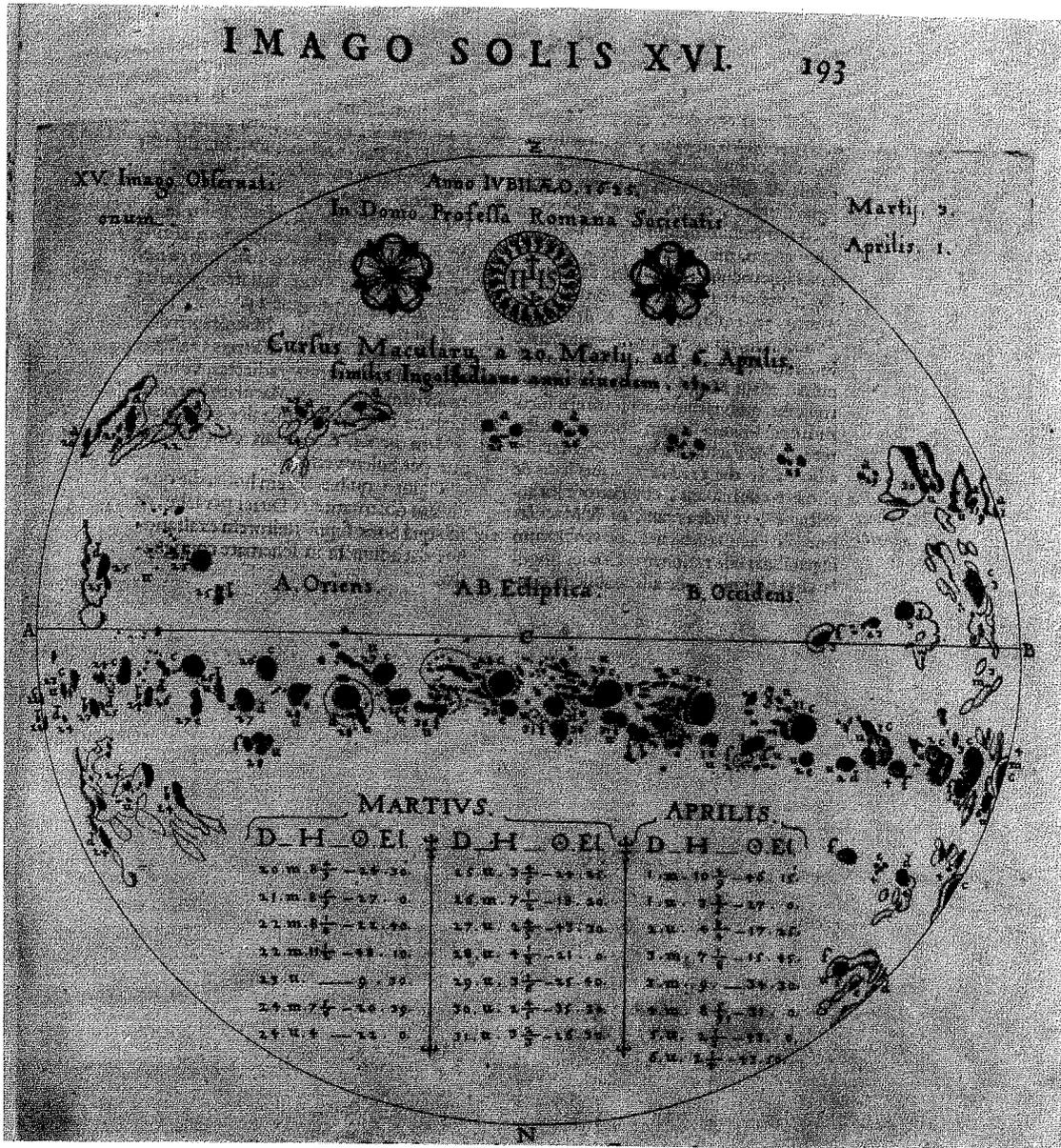
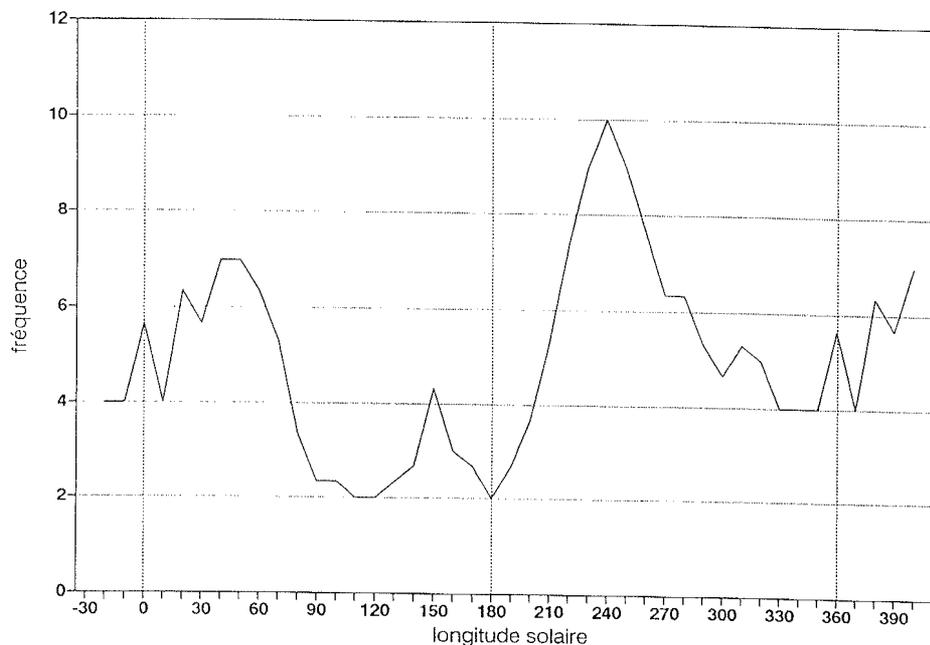


Fig. 4. — Dessin de passages de taches solaires du 20 mars au 6 avril 1625 par le Père Scheiner (*Rosa Ursina*, 1630).

classe de 10° de longitude et lissée par la méthode des moyennes glissantes portant sur trois points consécutifs. On remarque deux zones privilégiées, au début (env. 45°) et à la fin (env. 250°) de la rotation de Carrington comme celles trouvées par Trellis (1971) pour les cycles 12 à 19. Notre trop petit nombre de données (3) pour la période analysée nous interdit d'aller plus en avant dans cette comparaison, mais on peut supposer que ces zones privilégiées ont un caractère permanent à long terme.

COORDONNEES CARRINGTON  
des taches de 1623-27 et 1642-44



---

Fig. 5. — Courbe de fréquence représentant les taches observées par le Père Scheiner et Hévélius disposées en coordonnées Carrington.

---

L'analyse des données de cette période (1610-1645) ne permet donc pas de présenter un niveau d'activité tachée homogène pour toutes les observations faites par les pionniers de l'astronomie solaire. On peut en revanche conclure que l'apparition des taches solaires était loin d'être un phénomène rare et que l'activité devait se développer d'une façon similaire aux cycles que nous connaissons et qui ont été bien observés depuis 1850.

### *La période « d'incertitude » (1646-1670)*

Pour cette période il est très difficile de trouver des observations de taches solaires. Faut-il en conclure, comme certains auteurs l'ont préconisé (Eddy, 1976), que l'activité tachée du Soleil était très faible? Il est impossible de répondre à une telle question sans connaître préalablement la fréquence des observations du Soleil car nous ne disposons que de deux témoignages :

— l'un de l'astronome français Picard qui, ayant aperçu une tache solaire au mois d'août 1671 dit : « Il y avait dix ans entiers que je n'en avais pu voir aucune, quelque soin que j'eusse d'y prendre garde de temps en temps »;

Ces observations faites chaque fois que les conditions météorologiques étaient favorables permettaient aussi de contrôler la marche diurne des horloges et de déterminer avec précision les paramètres de l'écliptique.

Des mesures identiques étaient effectuées sur les taches qui apparaissaient sur le disque solaire.

Depuis la mise en œuvre du programme de Picard, le Soleil faisait donc l'objet d'une observation assidue et la rareté des taches était telle que chacune de leur apparition faisait l'objet d'un mémoire à l'Académie des Sciences, ou d'une note dans le *Journal des Savants*. Après 1704, l'augmentation de l'activité tachée fut si importante que l'Académie ne publia qu'un mémoire récapitulatif annuel, jusqu'en 1716.

Par ailleurs, il est important de préciser que les taches observées entre 1672 et 1704 étaient exclusivement apparues dans l'hémisphère Sud du Soleil et proches de son équateur (rarement plus haut que 10° Sud) (Maraldi, 1695). Plus tard, le 27 novembre 1707, quand Cassini et Maraldi observèrent une tache à 16° Nord, ils remarquèrent qu'ils ne se souvenaient pas en avoir vu avant dans cet hémisphère à l'exception de celle d'avril 1705 (Spoerer, 1889; Maunder, 1922).

De même, la présence de deux amas de taches distincts sur le disque solaire était très rare à cette époque puisque, à propos des taches observées en octobre 1705, il est noté dans l'Histoire de l'Académie pour cette année : « Depuis les observations du Père Scheiner faites il y a 80 ans, on n'avait guère vu en même temps deux différents amas de taches. Nous avons remarqué dans l'Histoire de 1700 combien ce phénomène était rare, cependant ce fut alors la seconde fois qu'il parut depuis deux ans ». Il faut dire que le peu de taches observées pendant une trentaine d'années, puis leur retour en nombre après 1702, laissaient perplexes les astronomes du début du xviii<sup>e</sup>. Nous en trouvons la preuve dans l'Histoire de l'Académie de 1713 où il est noté : « Les temps d'apparition des taches du Soleil ne sont nullement réglés. Depuis 1695, par exemple, jusqu'en 1700 on n'en avait point vu. Depuis 1700, nos Histoires en sont pleines jusqu'en 1710 où l'on n'en vit qu'une, il semble qu'elles tirassent à leur fin. En 1711 et 1712 on n'en a point observé et il en a paru une seule en 1713 au mois de mai... »

### Résultats

Les diagrammes de la figure 6 montrent la fréquence des observations solaires journalières à Paris (a) et les jours d'observation d'une tache sur le disque solaire (b). On voit que, à l'exception de l'intervalle qui s'étend de 1677 à 1682, durant lequel des astronomes furent envoyés en mission par le Roi, peu de périodes de 13 jours (durée du passage d'une tache sur le disque solaire), apparaissent sans observation du Soleil. Sur le diagramme des taches (b), les données des astronomes parisiens ont été complétées par les observations européennes faites par Kirch et sa famille (Landsberg, 1980), Etmüller, Liebknecht et Durham (Schröder, 1990).

L'examen de ce diagramme montre que peu de taches sont apparues entre 1671 et 1701 et qu'entre 1690 et 1699, une seule tache fut aperçue (en mai 1695) sur le Soleil. Le nombre total de jours d'observation de taches par décennie et l'estimation du nombre

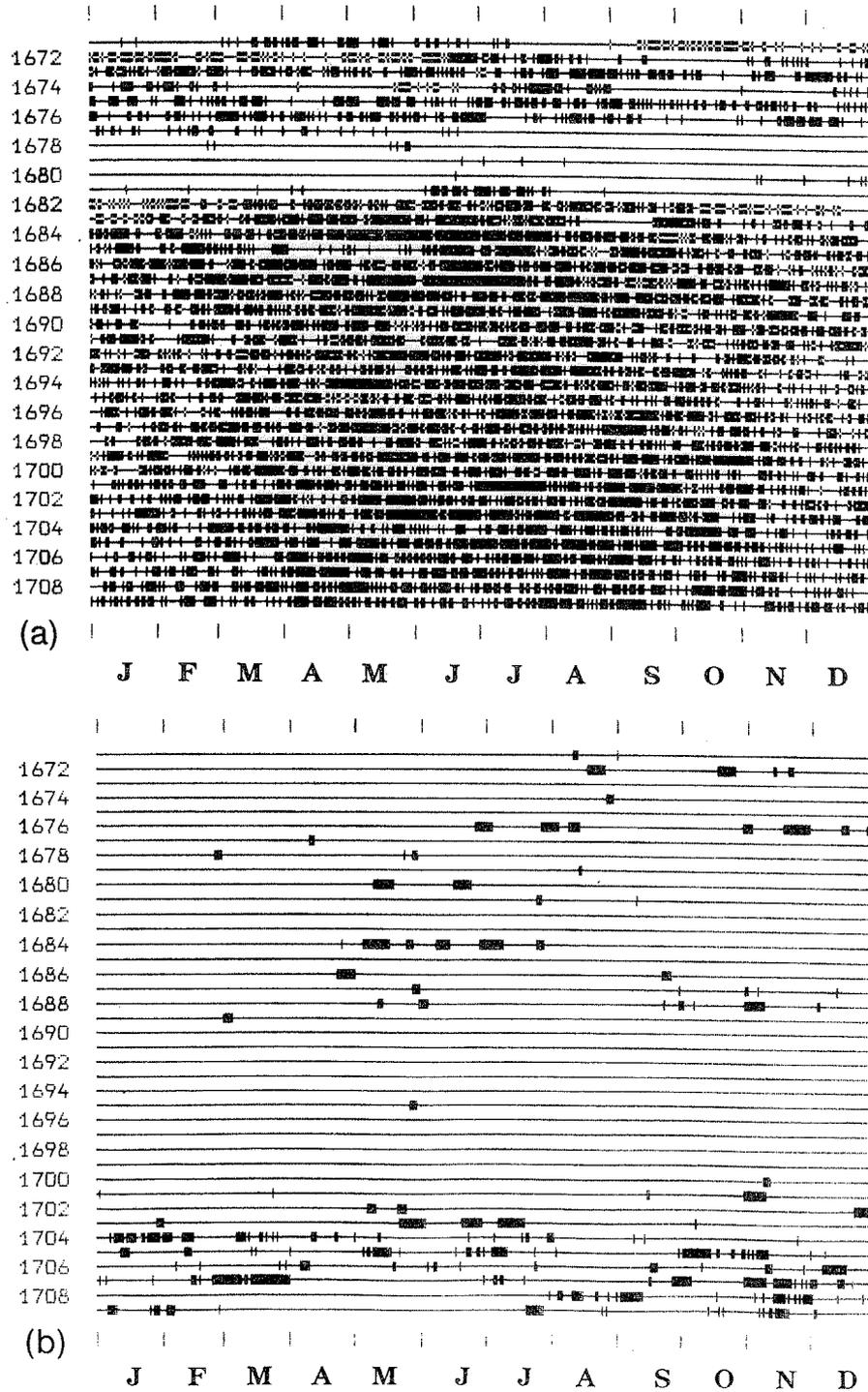


Fig. 6. — *Observations du Soleil* de 1671 à 1709 : (a), en haut, fréquence d'observation (les traits évidés marquent les jours d'observation de Cassini seul); (b), en bas fréquence d'apparition des taches, tous observateurs européens confondus.

moyen annuel de naissance ou de passage de taches sur le disque solaire peuvent se résumer ainsi :

- 1671-1680 : 110 jours d'observation, 1,8 passages/an;
- 1681-1690 : 98 jours d'observation, 2,1 passages/an;
- 1691-1700 : 10 jours d'observation, 0,3 passage/an;
- 1701-1710 : 483 jours d'observation, 8,1 passages/an.

Comparées aux valeurs obtenues pour les observations du Père Scheiner (49 passages/an) et d'Hévélius (25 passages/an), l'activité tachée a été très faible à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, notamment entre 1691 et 1700.

### *Remarque sur le nombre de Wolf pour le XVII<sup>e</sup> siècle*

Dans la formule empirique  $R = K(10g + f)$  établie par Wolf pour déterminer le nombre relatif de taches solaires, la valeur du coefficient  $K$  est fonction de l'instrument utilisé et de l'observateur. Wolf a attribué une valeur de 1 à ce coefficient pour la lunette avec laquelle il observait, qui avait un objectif de 75 mm de diamètre et un grossissement de 64. Pour un instrument plus puissant,  $K$  est inférieur à l'unité, il est supérieur dans le cas contraire. Wolf tenait compte aussi de l'assiduité de l'observateur dans la détermination de la valeur  $K$  (Young, 1883).

Dans ces conditions, il paraît difficile d'appliquer cette formule comme l'a fait Wolf lui-même pour calculer les nombres relatifs de taches avant 1671 pour les raisons suivantes :

- (a) les caractéristiques des instruments utilisés à cette époque sont peu connues et même parfois inconnues;
- (b) on ne connaît pas non plus le nombre annuel de jours d'observations du Soleil avant 1671, c'est-à-dire l'assiduité des observateurs qui dépend principalement des conditions météorologiques et aussi de facteurs personnels.

Le tableau suivant présente quelques nombres annuels relatifs de taches calculés par Wolf (Waldmeier, 1961), comparés aux passages de taches dénombrés par Lalande (1776) et nous mêmes :

Année	$R$	Nombre de passages de taches	Nombre de jours d'observations solaires connus
1625 . . . . .	41	88	?
1626 . . . . .	40	27	?
1627 . . . . .	22	7	?
1643 . . . . .	16	21	?
1644 . . . . .	15	26	?
1684 . . . . .	11	4	259
1642 . . . . .	6	2	?
1695 . . . . .	6	1	200

Son examen montre l'incohérence des résultats en l'absence de toutes données complémentaires qui nous éclaireraient sur la valeur que Wolf attribuait au coefficient  $K$ . Par exemple, il y a un rapport 7 entre les nombres  $R$  pour les années 1625 et 1695, alors que ce rapport atteint 88 entre les nombres de passages de taches!

Il est à noter que les calculs de Sakurai, cités précédemment pour déterminer l'activité tachée des mois de juin et juillet 1612, semblent plus fiables car ils ont été obtenus à partir de 38 jours d'observation de taches sur une période de deux mois. Dans ce cas, c'est principalement l'effet instrumental qui peut introduire une incertitude dans ces résultats.

### ***Moyens techniques et conditions météorologiques d'observation à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle***

#### *Les instruments*

Les lunettes utilisées au début du XVII<sup>e</sup> siècle présentaient des défauts d'exécution dus à l'insuffisance de la technique des verriers et des opticiens, auxquels venaient s'ajouter les aberrations propres aux lentilles minces. C'est sous l'influence de Huygens que, vers 1650, l'optique astronomique évolua vers une bien meilleure qualité.

En effet, des expériences avaient montré qu'on pouvait améliorer l'image d'une lunette en augmentant la distance focale de l'objectif : à diamètre et grossissement constants, l'aberration de sphéricité se trouvait réduite et, simultanément, le diamètre angulaire de la tache de la diffusion chromatique était diminué. « Dans le temps qu'on s'occupait ainsi à perfectionner le travail des objectifs, on ne voyait point de bornes à la longueur des lunettes et aux découvertes du ciel. On pensait qu'il serait possible de voir des animaux dans la Lune » (Auzout, cité par King, 1979). C'est pourquoi des lunettes de plus en plus longues furent construites; la distance focale de leur objectif ( $d=24$  cm) pouvait atteindre 68 m (Danjon et Couder, 1935). Ces instruments devinrent fort encombrants et difficiles à manier (*fig. 7 et 8*)! C'est avec un tel matériel que Huygens découvrit en 1655 un satellite de Saturne (Titan) et reconnut la véritable structure de l'anneau de cette planète, lequel avait tant intrigué Galilée. En 1664, Cassini observa pour la première fois l'ombre des satellites de Jupiter sur la surface de cette planète, en 1675 il aperçut la division des anneaux de Saturne et entre 1671 et 1684 il découvrit quatre nouveaux satellites de cette planète (Pingre, 1901).

Ces différentes découvertes prouvent la qualité des instruments utilisés au cours de la deuxième moitié du XVII<sup>e</sup> siècle.

Pour observer le Soleil, Picard et La Hire utilisaient un quart de cercle et un quadrant mural comportant une lunette munie d'un réticule dont la distance focale était d'environ 5 pieds (1,60 m) (Bigourdan, 1928). Ils devaient vraisemblablement utiliser, comme le faisait le Père Scheiner, une lame de verre coloré pour se préserver l'œil. De même, Cassini utilisait un grand quart de cercle ayant une lunette de 6 pieds (1,95 m) de distance focale, mais il faisait parfois des observations avec des instruments plus puissants pour examiner le détail des taches solaires ou pour mieux apercevoir de petites taches. Ainsi

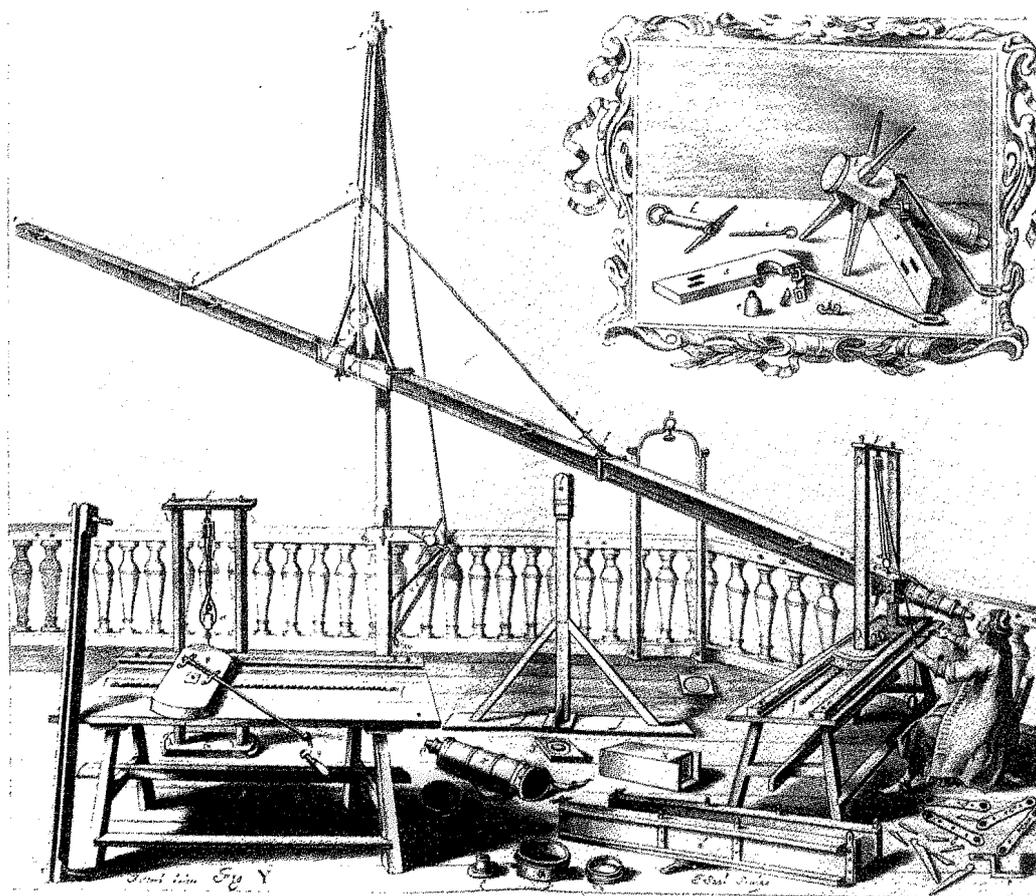


Fig. 7. — Hévélius observant avec sa lunette de 60 pieds (18 m) depuis la terrasse de son Observatoire, à Dantzig (*Machinae coelestis*, 1673).

son carnet d'observations comporte quelques indications que nous rapportons ci-dessous :

– 28 juillet 1684 : « A 6 h par l'image reçue dans le tambour de la grande lunette de 40 pieds (13 m), autant que la petitesse et la faiblesse de l'image de la tache l'a pu permettre avec le vent qui agitait la lunette, la tache était éloignée du bord de 6 parties et passait à la distance du centre de  $3\frac{1}{2}$  (parties) »;

– 29 juillet 1684 : « On ne peut voir la tache du Soleil même par la lunette de 20 pieds (6,5 m) »;

– 30 septembre 1688 : « J'ai aperçu deux taches dans le Soleil qui n'étaient point parues le matin ni à midi ».

Ces quelques observations particulières contredisent les propos de Kopecky et Kuklin (1987) qui affirment que les taches de longue durée de vie qui étaient visibles étaient seules observées, alors que les autres étaient simplement négligées.

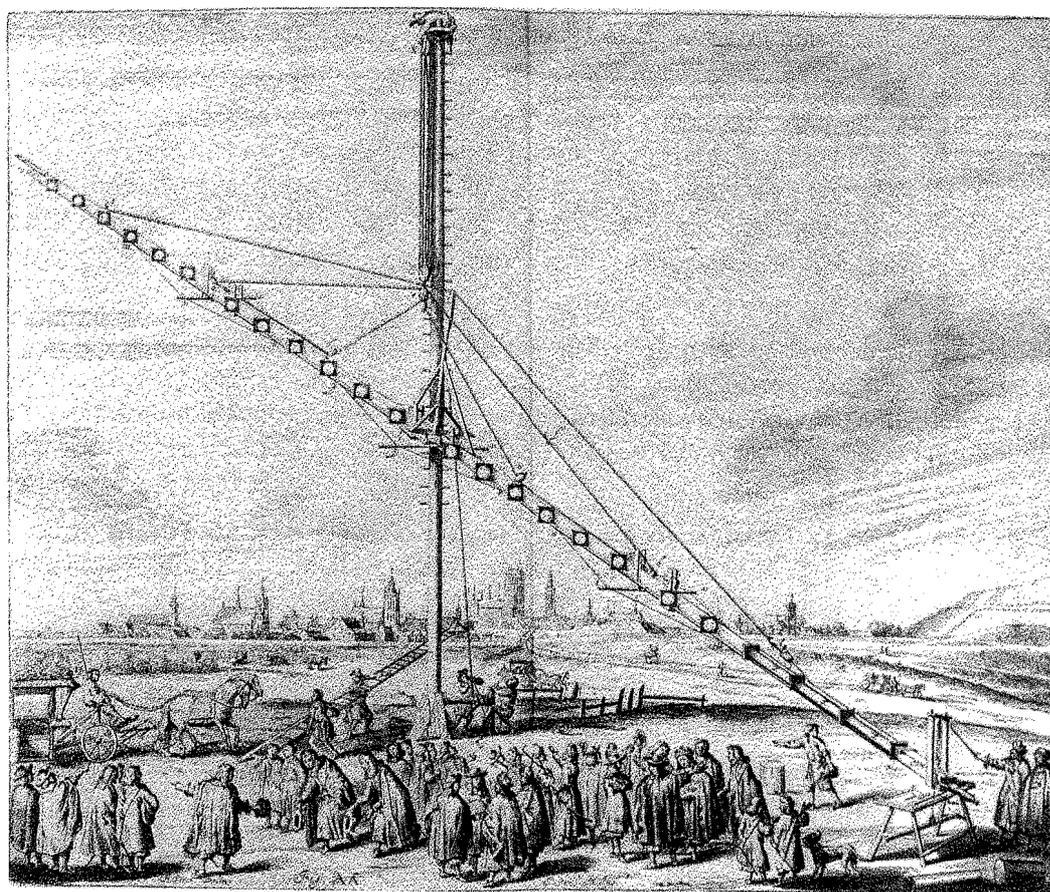


Fig. 8. — La grande lunette d'Hévélius de 150 pieds (45 m) installée à proximité de la ville de Dantzig. Elle était soutenue par un mat de 90 pieds (27 m), garni de moufles et de broches servant d'échelle (*Machinae coelestis*, 1673).

Cette brillante période des grands instruments au cours de laquelle de nombreuses découvertes ont été faites en astronomie physique, fut suivie d'un long déclin, car après la mort de Cassini en 1712, les grandes lunettes furent délaissées au profit des quarts de cercles :

« Cinquante ans plus tard [1760], écrivit Fabry, la technique de ces appareils était complètement perdue, et les astronomes étaient incapables de voir plusieurs des astres que Cassini avait découverts; le souvenir même de ces découvertes était presque perdu. L'invention des lunettes achromatiques par Dollond [1758], en Angleterre, ne modifia guère cette situation, car les premiers instruments de cette espèce, déjà très parfaits, étaient trop petits pour montrer ce que l'on voyait avec les instruments du xvii<sup>e</sup> siècle; mais ces lunettes contenaient le germe d'un progrès qui ne devait porter tous ses fruits

que plus tard. C'est en réalité avec les télescopes à réflexion, connus depuis très longtemps mais non sérieusement utilisés, que Herschel [en 1789] renoua la tradition interrompue des grands observateurs des premières années de l'Observatoire (de Paris) » (Danjon et Couder, 1935).

L'observation du Soleil n'échappa pas à ce déclin comme le nota Lalande au début de son long mémoire de 1776 sur ce sujet :

« Depuis plus de 60 ans, l'on n'a presque rien fait sur les taches du Soleil, sur sa rotation et sur la situation de son équateur et de ses pôles. »

Il est donc clair que les instruments astronomiques à la fin du xvii<sup>e</sup> siècle étaient assez précis pour que la fiabilité des observations du Soleil ne puisse être mise en doute et que les astronomes suivaient avec attention l'évolution de l'activité tachée de l'astre du jour.

### *Les conditions météorologiques*

Le xvii<sup>e</sup> siècle, qui a connu des conditions météorologiques particulièrement variables, correspond à une partie de cette période que l'on appelle « le petit âge glaciaire », dont la durée est principalement définie par l'expansion des glaciers alpins (*voir* annexe I).

La couverture nuageuse durant cette époque n'est bien connue que par les 40 ans de relevés météorologiques de Louis Morin. Ces relevés, faits à Paris trois fois par jour entre 1675 et 1713, concernant la température, la pression, la direction des nuages et la nébulosité (Legrand et Le Goff, 1987), permettent de montrer la faible influence du climat sur les observations des taches solaires, contrairement aux suppositions faites par Kopecky et Kuklin (1987).

Dans son journal météorologique, Morin caractérisait la nébulosité par un indice qui variait de 0 pour les jours clairs à 4 pour les jours entièrement couverts.

Pour chaque jour d'observation solaire à l'Observatoire de Paris, nous connaissons donc l'indice de couverture nuageuse. Nous avons pu calculer, pour chaque indice, le pourcentage moyen du nombre de jours d'observations en fonction du nombre total de jours avec cet indice (de 1682 à 1709) :

- indice 4 (couvert) : 8 % d'observations pour 44 jours/an;
- indice 3 : 34 % d'observations pour 55 jours/an;
- indices 1 et 2 : 71 % d'observations pour 219 jours/an;
- indice 0 (jour clair) : 97 % d'observations pour 47 jours/an.

La moyenne générale, pour l'ensemble de ces 28 années, est de 61 %, comparable à celle de l'Observatoire de Meudon entre 1930 et 1940 (Martres, 1987).

Les relevés de Morin montrent aussi une nette augmentation du nombre de jours couverts (avec indice 4) pendant la décennie 1690-1699 : 54 jours/an en moyenne avec un maximum de 83 en 1692; le nombre de jours clairs étant resté très stable. Cet accroissement du nombre de jours couverts, provoqué par le passage fréquent de fronts et la persistance d'un anticyclone sur la mer du Nord (Legrand *et al.*, 1990 *a*) n'eut aucune répercussion notable sur le nombre de jours sans observation du Soleil. On peut donc conclure que, pendant la dernière moitié du xvii<sup>e</sup> siècle et jusqu'à la fin du règne du Roi

Soleil, l'astre du jour a été attentivement observé chaque fois que le temps le permettait. On peut même affirmer que la couverture nuageuse de la période la plus froide de cette époque (1690-1700) n'est aucunement la cause de l'inobservation de taches solaires.

### *L'activité aurorale au XVII<sup>e</sup> siècle*

#### *Les sources solaires de l'activité magnétosphérique et les conditions d'apparition des aurores*

##### *Les sources solaires*

L'analyse des données géomagnétiques, portant sur 120 ans, entreprise par Legrand et Simon (1989, 1990; Simon et Legrand, 1989, 1990) montre qu'il existe deux sources solaires de l'activité magnétosphérique, c'est-à-dire des activités géomagnétique, aurorale et ionosphérique :

(a) les événements transitoires liés au cycle de taches, qui donnent naissance à des ondes de choc;

(b) les jets de vent solaire dont la vitesse est supérieure à 450 km/sec.

La distribution des vitesses de vent solaire est déterminée par l'intensité et la direction du dipôle solaire dont le cycle est lié à celui des taches mais en opposition de phase. Les vents les plus rapides s'échappent des pôles du dipôle et les plus lents de la « lame neutre » située à l'équateur de ce dipôle. De ce fait la Terre est balayée par des vents rapides, soit lorsque le dipôle atteint son maximum d'intensité et qu'il est peu incliné sur l'axe de rotation du Soleil, soit lorsque le dipôle se retourne durant la phase du maximum des taches. Cette évolution est succinctement décrite sur la figure 9.

Cependant, pour des cycles de taches de faible amplitude ( $R_{\max} < 40$ ), au maximum d'intensité du dipôle, les vents rapides d'origine polaire n'atteignent jamais la Terre et la « lame neutre » est épaisse. Durant cette phase, l'activité géomagnétique et aurorale est très faible puisque la Terre est balayée par des vents de faible vitesse. Il n'en est pas de même au moment du retournement du dipôle, c'est-à-dire durant la phase multipolaire au cours de laquelle des vents relativement rapides émanant des régions contiguës à la « lame neutre » peuvent atteindre la Terre.

##### *Les conditions d'apparition des aurores aux moyennes et basses latitudes*

Pour qu'une aurore puisse être observée sans confusion aux moyennes et basses latitudes européennes, il est nécessaire que l'ovale auroral boréal s'étende au sud de sa position moyenne située vers 66° de latitude géomagnétique.

En règle générale, une aurore se développe entre 400 et 100 km d'altitude et le maximum d'intensité de la raie rouge (6303 Å) se situe vers 300 km. D'après le diagramme de la figure 10, elle peut donc être bien visible à 10° au-dessus de l'horizon à une distance de 1100 km, soit à une latitude inférieure de 10° à celle où naît ce phénomène. Ainsi, les

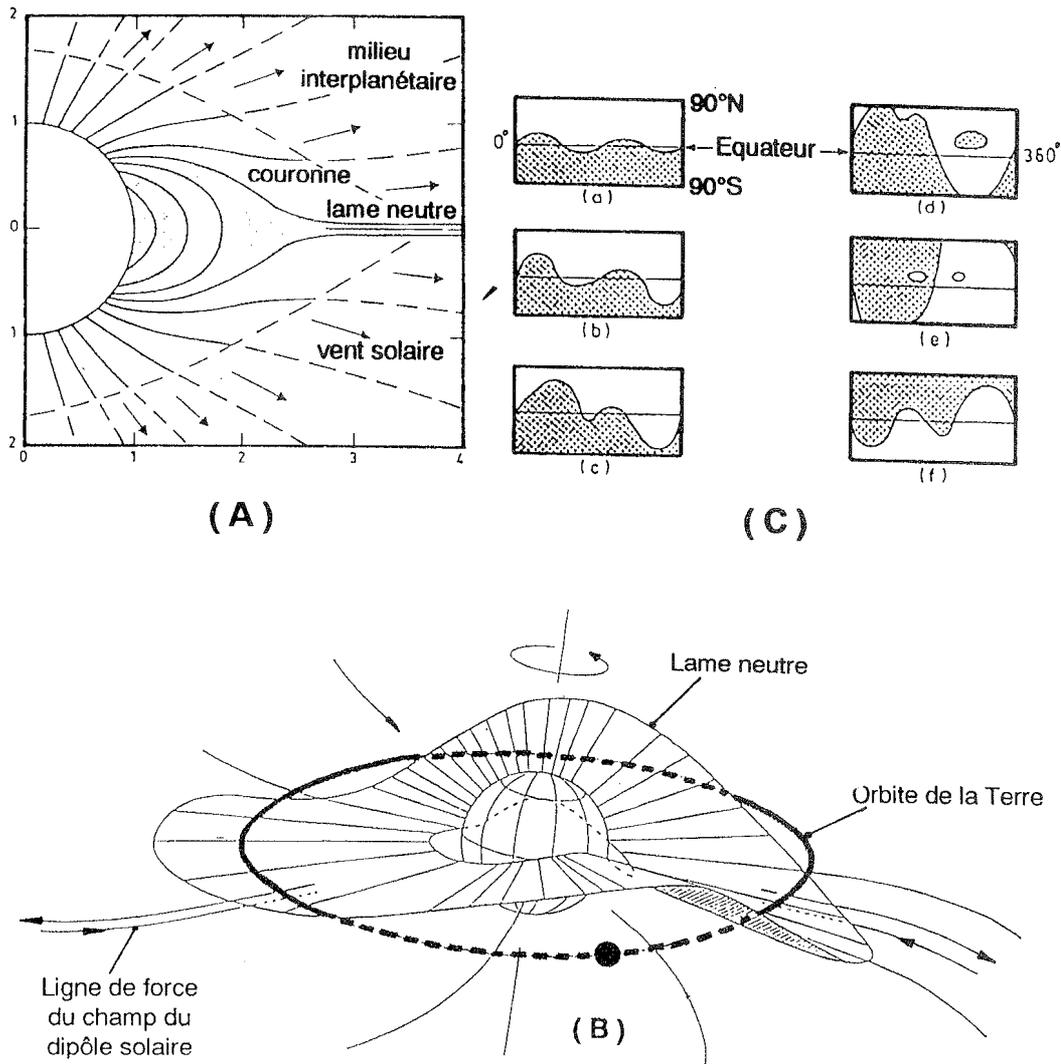


Fig. 9. — Structure et évolution de la « lame neutre » du dipôle solaire. (A) Modèle théorique du champ du dipôle solaire déformé par le flux du vent solaire : la ligne discontinue schématise le passage du plasma de la couronne solaire au milieu interplanétaire. Le plasma, piégé par le champ coronal dans la zone équatoriale (en grisé), ne peut s'échapper que par la « lame neutre » qui se forme entre les deux nappes magnétiques de polarités opposées. (B) Représentation de la « lame neutre » du dipôle solaire au niveau de l'orbite de la Terre (T) : Dans ce schéma, la terre, au cours d'une rotation solaire (27,3 jours), traverse quatre fois la « lame neutre », source de plasma de faible vitesse. Entre chacune de ces traversées, elle est balayée par du vent solaire de vitesse plus élevée provenant des régions contiguës à la « lame neutre ». (C) Cycle du champ du dipôle solaire établi d'après les données photosphériques de 1963 à 1984 : chaque rectangle correspond à une période différente du cycle de 11 ans. En ordonnées, les latitudes solaires, en abscisses, les longitudes Carrington. Les régions blanches et grises sont respectivement de polarité Nord et Sud. Elles sont séparées par une ligne montrant la configuration de la « lame neutre ». (a) et (b) montrent une phase pendant laquelle la configuration du champ coronal est dominée par le dipôle solaire. (c), (d) et (e) montrent les étapes du retournement de la « lame neutre » s'effectuant pendant le changement de polarité du dipôle. La forme de la ligne neutre est la signature de cette configuration multipolaire. On voit que la « lame neutre » monte à des latitudes élevées, ce qui amène des sources de vent rapide dans le plan équatorial. (f) correspond au retour à une configuration dipolaire mais avec des polarités inversées : la « lame neutre » se rapproche du plan de l'équateur.

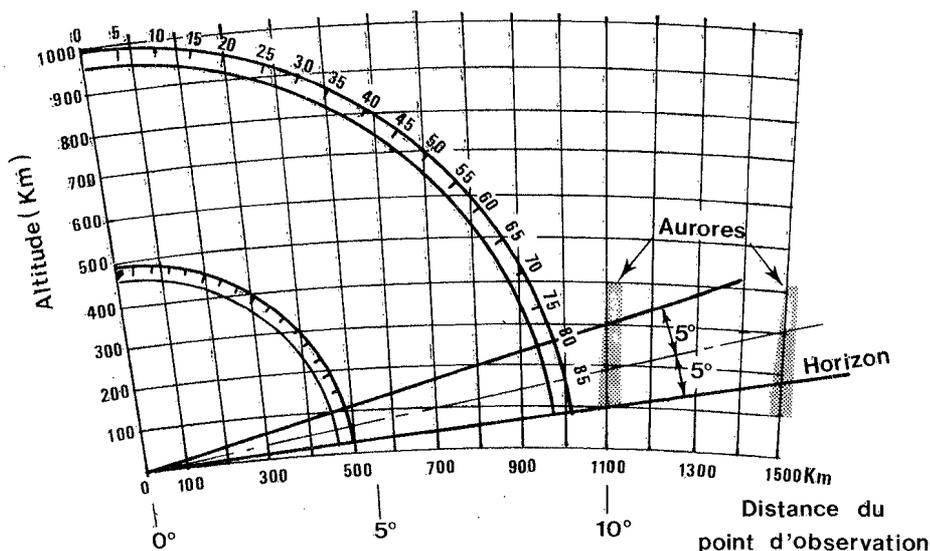


Fig. 10. — Diagramme de visibilité des aurores en fonction de leur distance d'apparition par rapport à une station d'observation.

aurores en limite de visibilité à  $50^\circ$  de latitude géographique, se développent à la verticale d'environ  $60^\circ$  (Legrand, 1990).

Par ailleurs, Legrand et Simon (1988, 1989) ont étudié la distribution en latitude de 453 aurores observées entre 1956 et 1965 au zénith de plusieurs stations britanniques formant une chaîne s'étendant de Calais aux îles Féroé.

La figure 11 montre la fréquence d'apparition de ces aurores en fonction de la latitude géomagnétique ( $\Phi$ ) selon qu'elles sont provoquées par des ondes de choc ou bien par des jets de vent solaire. Sur cette figure on s'aperçoit que les aurores provoquées par les jets de vent solaire n'apparaissent pas au-delà de  $\Phi = 57^\circ$  alors que celles produites par les ondes de choc peuvent être observées à des latitudes plus basses. A partir de ces résultats, nous avons calculé pour chaque latitude géomagnétique d'observation, les proportions (en %) d'aurores provoquées par l'un ou l'autre des phénomènes solaires visibles à  $10^\circ$  au-dessus de l'horizon tout autour du point d'observation.

On peut ainsi constater (*fig. 12*) que les aurores observables au-dessous de  $47^\circ$  de latitude géomagnétique sont produites uniquement par les ondes de choc, alors qu'au-dessus de  $55^\circ$  les aurores observées proviennent en majorité des jets de vent solaire.

Cette distribution a été établie à partir d'aurores apparues au cours d'un cycle de taches particulièrement fort (1956-1965), mais Stringer et Belon (1967) ont montré que la position du maximum d'activité aurorale ne changeait pratiquement pas dans le cas d'une activité tachée beaucoup plus faible. On peut donc supposer que les aurores observées au  $xvii^e$  siècle présentaient une distribution similaire.

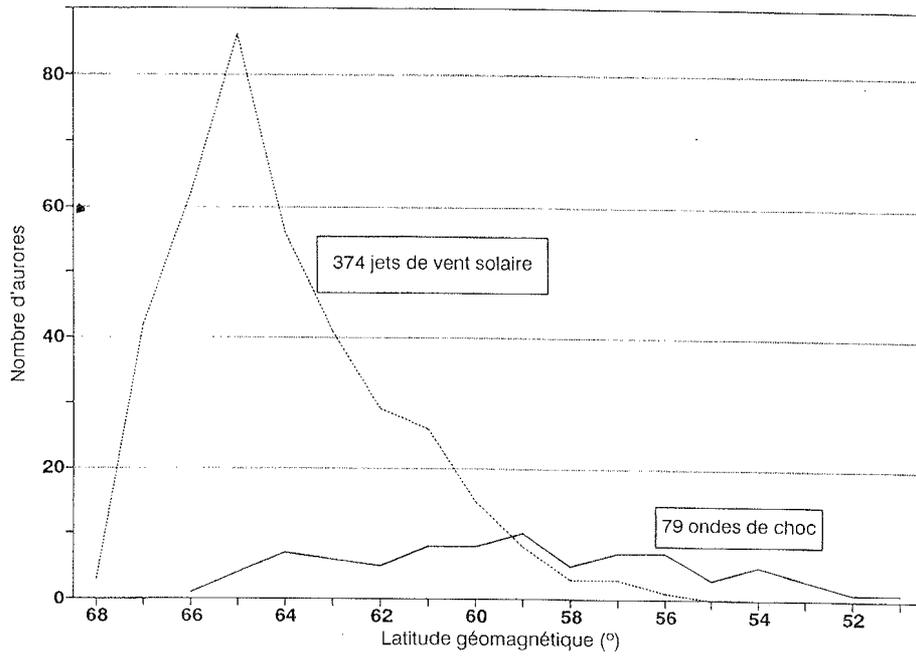


Fig. 11. — *Distribution des aurores* produites par les jets de vent solaire et par les ondes de choc entre 1956 et 1965. Ces aurores sont observées au zénith de stations britanniques réparties de Calais aux îles Féroé.

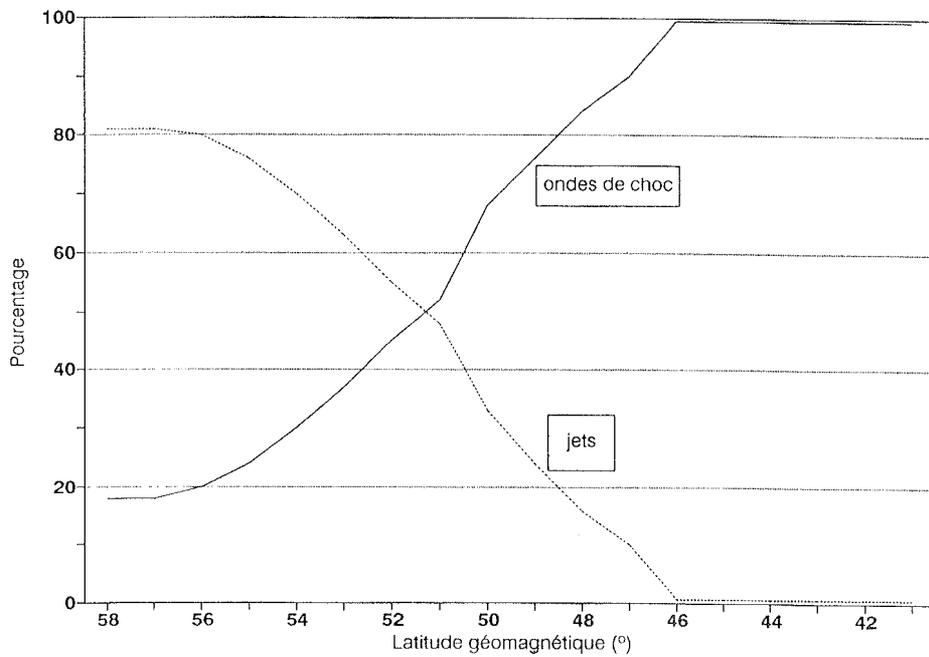


Fig. 12. — *Pourcentage d'aurores visibles* d'une station selon leur origine en fonction de la latitude géomagnétique.

Il faut savoir aussi que le pôle géomagnétique subit des variations de position au cours des siècles et que, précisément au xvii<sup>e</sup> siècle, la localisation du pôle Nord magnétique était de 4° plus près de l'Europe qu'actuellement (Champion, 1980). On peut ainsi constater sur la figure 13 que les aurores produites par les jets de vent solaire étaient mieux visibles en Europe centrale et occidentale. Les latitudes géomagnétiques y étaient supérieures de 4° environ à celles d'aujourd'hui dans cette région du globe.

### *L'observation des aurores au xvii<sup>e</sup> siècle*

Les grandes aurores se développant aux moyennes et basses latitudes étaient connues depuis fort longtemps. Elles ont été décrites, notamment en Europe et en Chine où la civilisation s'était développée précocement, par les philosophes et les érudits dans des chroniques qui furent publiées après l'invention de l'imprimerie au xv<sup>e</sup> siècle. Les descriptions comportaient toujours des termes fantastiques mêlés à des concepts superstitieux (voir tableau I) car ce phénomène était considéré par les hommes de ces époques comme un signe de mauvais augure qui annonçait la guerre, la disette ou quelque autre fléau. Les gravures reproduites figures 14 et 15 illustrent bien la crainte que de tels apparitions provoquaient parmi les populations.

La première description scientifique d'une aurore fut publiée par Conrad Gesner (1516-1565) à la suite de l'apparition du 6 janvier 1561. Elle contenait des détails sur la fluctuation des couleurs, sur la brillance et sur la structure : arcs, rayons, taches diffuses, couronnes.

TABLEAU I. — Descriptions typiques des aurores en termes médiévaux.

Termes latins	Notation moderne	Termes latins	Notation moderne
<i>Acies militum</i>	Lignes de soldats	<i>Homo candens</i>	Homme devenant d'un blanc éclatant
<i>Arcum caelestis</i>	Arc céleste	<i>Hostes sanguinei</i>	Ennemis ensanglantés
<i>Arma</i>	Armes	<i>Monstra</i>	Monstres
<i>Caelum apertum</i>	Le ciel est ouvert	<i>Nubes ardentes</i>	Nuages étincelants
<i>Castella</i>	Châteaux-forts	<i>Plaga caeli rubuit</i>	Une région du ciel devint rouge
<i>Civitates</i>	Cités	<i>Pugna</i>	Bataille
<i>Cohortes peditum</i>	Cohorte de fantassins	<i>Rubea fruba signa</i>	Empreintes rougeâtres
<i>Crucifix</i>	Crucifix	<i>Signum antichrist</i>	Signes de l'antéchrist
<i>Draco</i>	Dragons	<i>Apecies ignearum facularum</i>	Flammes ardentes
<i>Enses</i>	Épées, Glaives	<i>Trabes ardentes</i>	Poutres embrasées
<i>Figura ignens</i>	Forme s'enflammant	<i>Turba equitum</i>	Multitude de cavaliers
<i>Flamma</i>	Flamme	<i>Vapor</i>	Vapeur
<i>Fumus ignens</i>	Nuée ardente	<i>Vexillum purpureum</i>	Etendard de couleur pourpre
<i>Voragine</i>	Gouffres	<i>Naves</i>	Bateaux

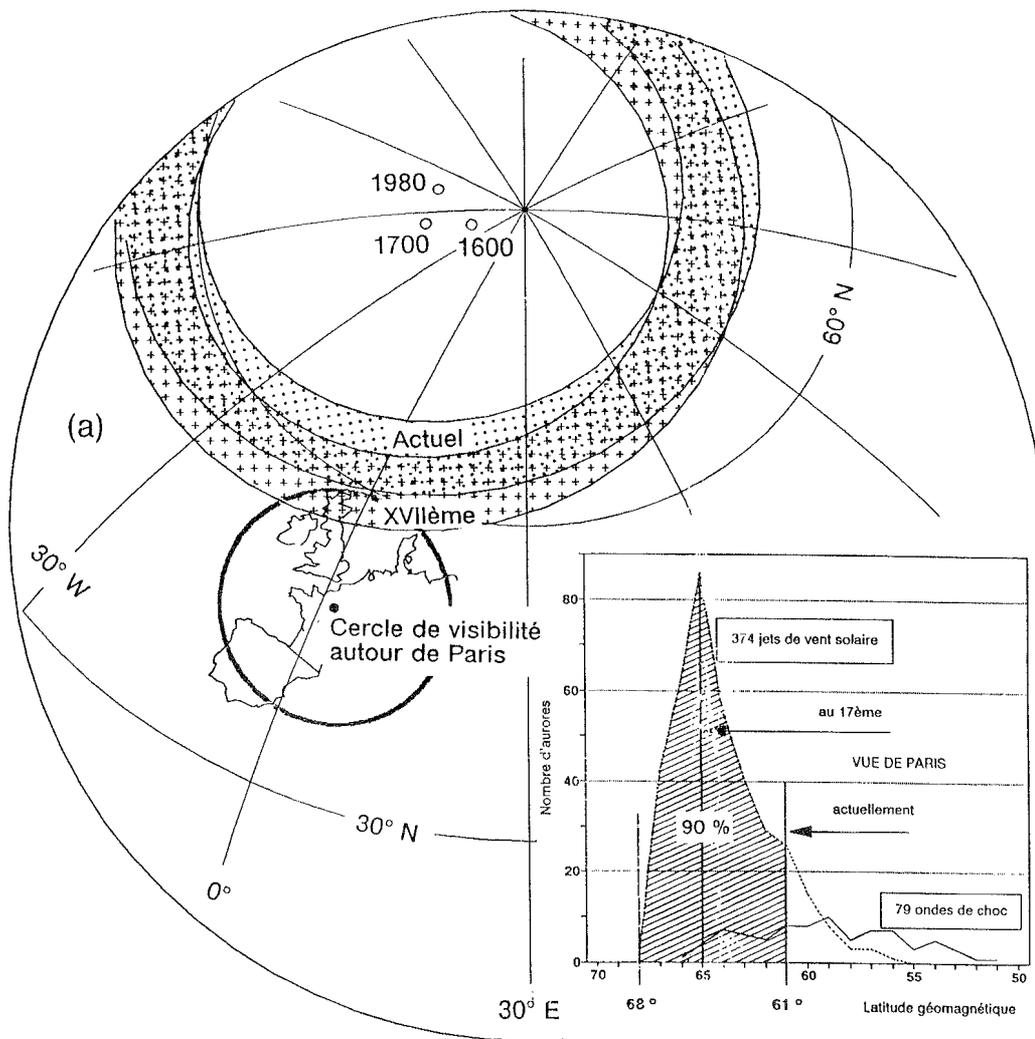


Fig. 13. — Figure montrant la position de la zone aurorale liée aux jets de vent solaire par rapport à une station située à 50° de latitude Nord au XVII<sup>e</sup> siècle et au XX<sup>e</sup> siècle.

Au cours des XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles, un nombre substantiel d'observations de ce phénomène a été rapporté dans les chroniques ou mémoires de ces temps. Mais des guerres comme celle de Trente ans (1618-1648) ou des révoltes apportèrent leurs lots de destructions en Europe centrale et entraînèrent la perte de documents précieux; heureusement, quelques ouvrages ont survécu, par exemple le journal des astronomes David Fabricius (1564-1616) et Johan Fabricius (1587-1615) ainsi que celui de la famille Kirch (entre 1677 et 1774) qui contiennent un nombre notable de données aurorales parmi les descriptions de la surface solaire. Plus généralement les chroniques anciennes et les



---

Fig. 14. — *Représentation d'une aurore boréale observée à Nuremberg (Allemagne) le 5 octobre 1591 (Bibliothèque particulière).*

---

carnets d'observation des érudits ont été « fouillés » par différents auteurs tels : De Mairan, Frobeseus, Schöning, au XVIII<sup>e</sup> siècle, Fritz au XIX<sup>e</sup>, et Link, Keimatsu, Schröder, parmi les plus récents, pour établir des catalogues dont certaines données remontent à plusieurs siècles avant J.-C. Certains de ces catalogues contiennent non seulement des dates d'apparitions d'aurores, mais aussi celles de comètes, de bolides et de phénomènes atmosphériques. L'exploitation de ces données demande un travail considérable car chaque description de ces événements doit être examinée minutieusement pour les identifier avec certitude.

Pour l'Europe, les observations étaient faites généralement depuis des pays situés entre 48 et 54° de latitude géographique : Allemagne, Autriche, France, Hongrie, Italie, Suisse. Peu de données aurorales proviennent d'Angleterre et de Russie. Les observations étaient généralement irrégulières mais les événements auroraux remarquables étaient toujours rapportés sauf évidemment dans le cas de ciel entièrement couvert.

Entre 1550 et 1710, environ 430 aurores visibles en Europe ont été cataloguées, dont environ 150 entre 1645 et 1710, période correspondant au minimum dit de Maunder.

Pour apprécier l'homogénéité des données recueillies pour ces XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles, nous avons examiné la variation saisonnière du nombre d'aurores rapportées, qui doit suivre celle de l'activité géomagnétique dont les maximums apparaissent aux équinoxes et les minimums aux solstices.

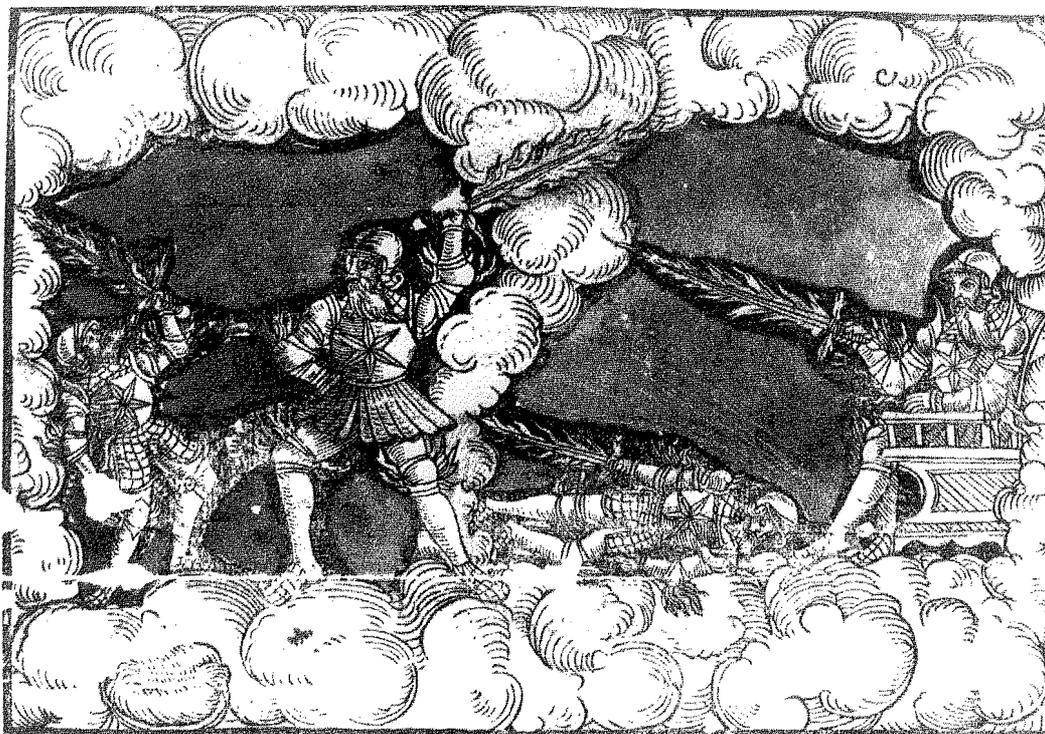
Nous avons tracé sur la figure 16 cette variation pour deux périodes distinctes étudiées par Schröder :

(a) avant le minimum de Maunder de 1545 à 1644;

(b) plus récemment, de 1882 à 1956.

Les minimums de juin et décembre apparaissent clairement pour les données (b) alors que seul le minimum du solstice d'été est visible pour l'ensemble des données (a). Ce minimum estival pour les latitudes considérées (48°-54°N) étant principalement produit par l'effet crépusculaire dû à la faible hauteur du Soleil sous l'horizon, ne peut nous renseigner sur le degré d'homogénéité des données anciennes. Par contre, l'absence de minimum du solstice d'hiver et de maxima marqués aux équinoxes, nous laisse supposer que toutes les observations disponibles sont seulement un échantillonnage incomplet de l'activité aurorale.

La fréquence d'apparition des aurores entre 1545 et 1728 présentée sur la figure 17 (Schröder, 1990) montre, malgré le manque d'homogénéité des données, un déficit du nombre d'aurores entre 1640 et 1702 caractérisé par l'absence totale d'importants maximums.



---

Fig. 15. — Représentation de la grande aurore du 24 juillet 1554, observée en Allemagne et en Suisse (Bibliothèque particulière).

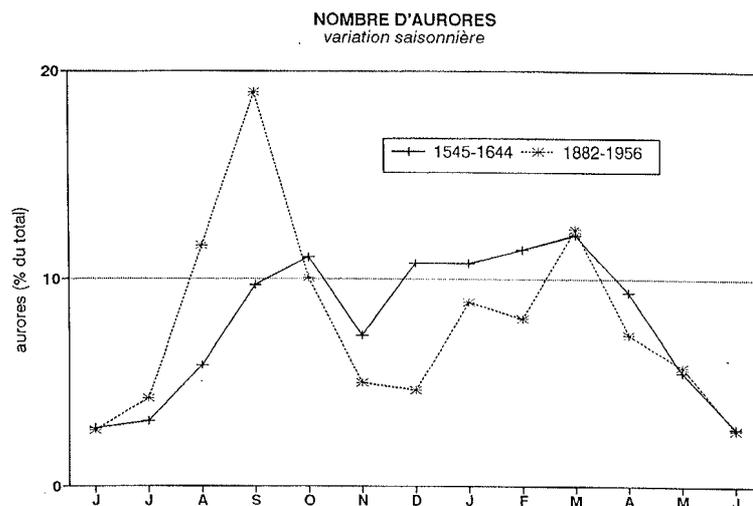


Fig. 16. — Variation saisonnière du nombre d'aurores observées en Europe au cours de deux périodes, ancienne (1545-1644) et récente (1882-1956).

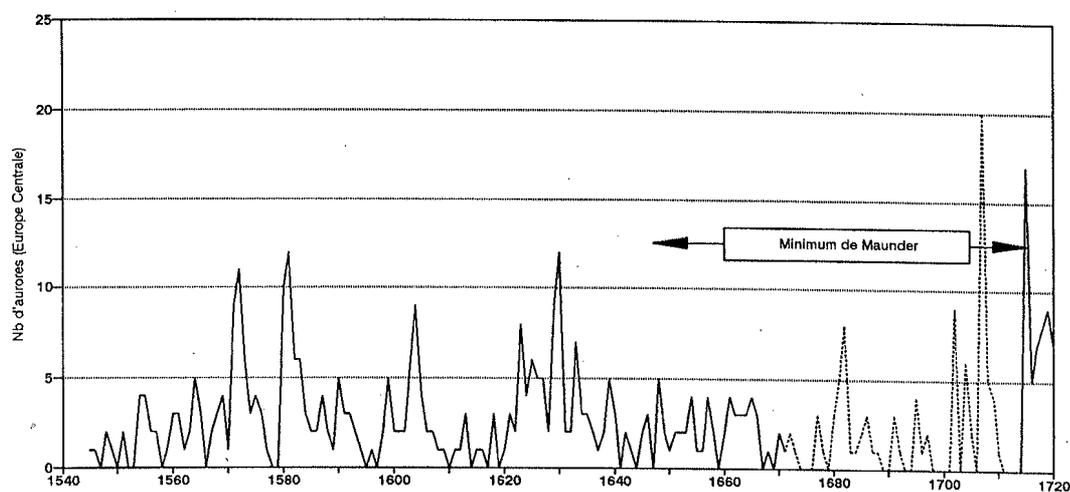


Fig. 17. — Courbe des fréquences annuelles d'observation d'aurores en Europe centrale. La portion de courbe en pointillé représente une période du minimum de Maunder pendant laquelle l'activité tachée est connue avec le plus de précision.

### *Périodicité de l'apparition des taches et des aurores*

L'ensemble des données concernant la période la plus sûre pour l'activité tachée, de 1671 à 1710, rassemble 91 jours d'observation d'aurores et 651 jours d'observation de

taches solaires. Ce faible nombre d'événements, représentant une durée un peu inférieure à quatre cycles solaires moyens, rend incertaine la recherche d'une périodicité. Nous avons néanmoins calculé les périodogrammes des deux séries arrangées par valeurs semestrielles. On a testé la stabilité des périodogrammes en effectuant les calculs sur les séries brutes, puis corrigées de la tendance par régression jusqu'au deuxième degré et lissées ou non par la moyenne glissante sur trois points. Les deux séries sont présentées sur la figure 18 (en valeurs annuelles) :

(a) *Les aurores* : les tentatives ont été infructueuses à cause de l'instabilité des résultats selon le traitement statistique des données. De plus, chaque mise à jour ajoutait son instabilité. Ceci tend à confirmer l'inhomogénéité de la série des aurores déjà remarquée dans le chapitre sur les sources solaires de l'activité magnétosphérique.

(b) *Les taches* : pour cette série, nous avons estimé le nombre de périodes de 13 jours (demi-rotation solaire) durant lesquelles un groupe de taches a été observé. Par ce moyen, nous accordons le même poids à une tache observée pendant tout le temps de son passage sur le disque solaire qu'à une autre tache qui n'aurait pas bénéficié de la même attention. Le nombre total de groupes est 123 avec un maximum semestriel de 8. Le périodogramme est ici beaucoup plus stable (*fig. 19*) et montre un maximum vers 9 ans. A titre de comparaison, nous avons tracé sur la même figure le périodogramme effectué sur les nombres de Wolf pour la même durée de 40 ans entre 1744 et 1783. Avec 50 fois plus

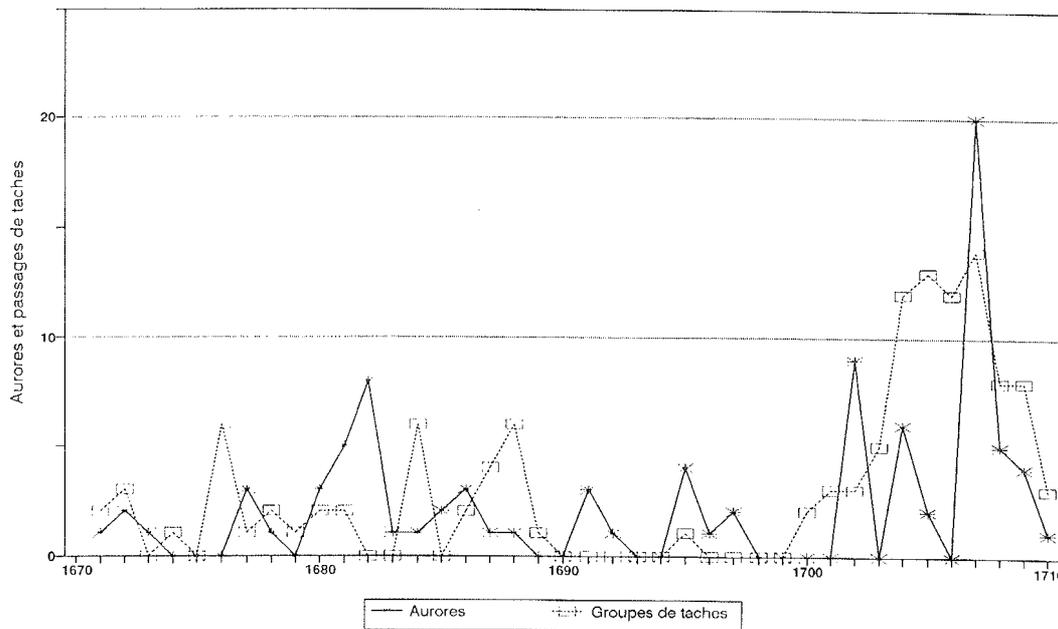


Fig. 18. — Courbe récapitulative de l'activité aurorale (en nombre total annuel) et de l'activité tachée (en nombre annuel d'observations sur 13 jours consécutifs) pendant les 40 années où ces deux événements sont datés avec certitude.

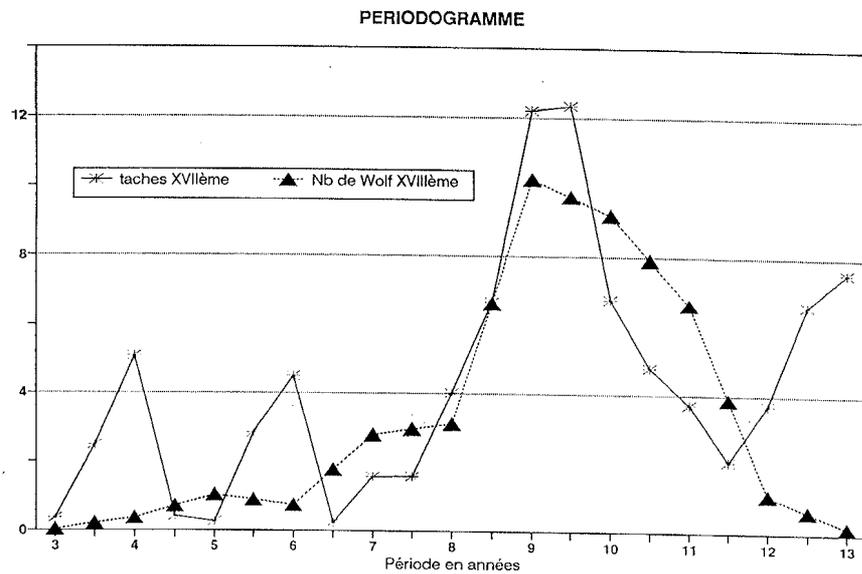


Fig. 19. — *Périodogrammes effectués sur la série des passages de taches de la fin du xvii<sup>e</sup> siècle (1671-1710, en trait continu) et sur une série de nombres de Wolf du xviii<sup>e</sup> siècle (1744-1783, en trait pointillé). Le maximum se produit pour une période de 9-10 ans sur ces deux séries de même durée.*

de données, la régularité est remarquable et nous sommes ici en présence d'une série de quatre cycles courts, autour de 9-10 ans.

On peut conclure — avec prudence — que, à la fin du xvii<sup>e</sup> siècle, la faible activité tachée s'est manifestée par quelques cycles courts (9-10 ans), dont il est impossible de préciser les dates des maximums, et que l'activité aurorale, telle qu'elle est actuellement connue, ne présente aucune corrélation avec l'activité de taches.

### ***La relation entre le passage des taches et l'apparition des aurores***

Pour analyser l'évolution de l'activité solaire au xvii<sup>e</sup> siècle et notamment durant la période de faible activité tachée (1671-1701), Legrand, Le Goff et Mazaudier (1990 *a, b*) ont étudié la coïncidence entre le passage des taches sur le disque solaire et l'apparition des aurores en Europe. On sait qu'une onde choc est émise quand, dans une région active du Soleil se développe une éruption chromosphérique importante associée à un sursaut dans le domaine du rayonnement X et du rayonnement radioélectrique. Cette onde atteint la Terre avec un délai d'une cinquantaine d'heures en donnant naissance à un orage magnétosphérique matérialisé par une aurore. Ce phénomène est d'autant plus intense que l'éruption se développe près du méridien solaire central entre 30°E et 30°W (Legrand, 1990). La comparaison des passages de taches et l'apparition d'une ou plusieurs

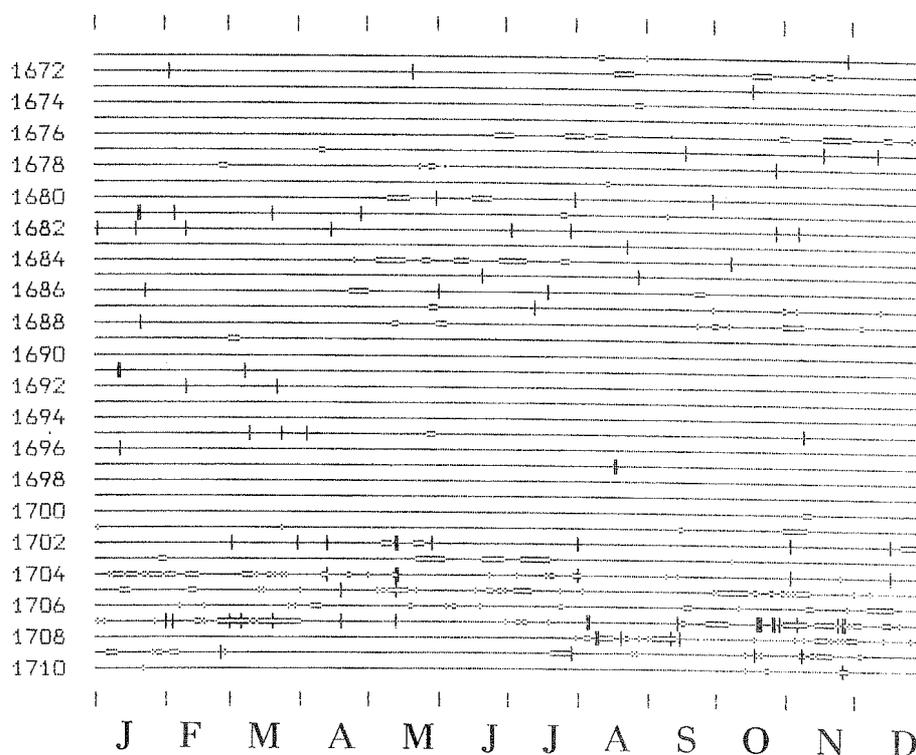


Fig. 20. Diagramme représentant les jours où des taches solaires (petit trait évidé) et des aurores (grand trait) furent observées entre 1671 et 1709.

aurores en Europe entre 50 et 55° de latitude peut donc nous renseigner sur l'activité des taches présentes à cette période sur le disque solaire. Sur le diagramme de la figure 20, on peut voir que sur les 44 aurores observées entre 1671 et 1701 provenant des catalogues de Link (1964), Schröder (1979) et Landsberg (1980), aucune ne coïncide avec le passage d'une tache tandis que durant la période de 1702 à 1709 sur les 47 observées il y a 28 coïncidences : 12 aurores présentent une coïncidence exacte et 16, une coïncidence estimée en supposant que les taches observées sont actives pendant une demi-rotation solaire (13 jours). Le tableau suivant résume l'ensemble des observations de taches et d'aurores pendant deux périodes : 1671-1701 et 1702-1710.

Si les aurores apparaissent au hasard, la probabilité de coïncidence entre une aurore ( $A$  = nombre de jours d'aurore) et une tache ( $T$  = nombre de jours de tache),  $\text{Pr}(AT/A)$ , devrait être égale à la probabilité d'observer une tache  $\text{Pr}(T/N)$ ,  $N$  étant le nombre total de jours considérés. Le calcul des intervalles de probabilité à 95 % pour  $T/N$  et  $AT/A$  (loi binômiale, Morice et Chartier, 1954) montre que :

- entre 1671 et 1701, il n'y a aucune coïncidence; l'hypothèse de l'indépendance entre aurore et tache peut être soutenue,  $\text{Pr}(T/N)$  étant inclus dans  $\text{Pr}(AT/A)$ ;

Période	1671-1701	1702-1710
Nombre total de jours (N) . . . . .	11 315	3 285
Jours d'observation du soleil (N1) . . . . .	4 098	1 892
Jours d'observation de taches . . . . .	233	418
Nombre estimé de jours avec tache (T) (avec 13 jours de durée de vie) . . . . .	585	1 014
Jours d'observation d'aurore (A) . . . . .	44	47
Nombre de coïncidences Tache/Aurore (AT) (temps de propagation inclus) . . . . .	0	28
Probabilité d'activité de tache Pr (T/N), population N1, seuil 95 %	4 à 6 %	28 à 32 %
Probabilité de coïncidence Pr (AT/A), population A, seuil 95 % . .	0 à 9 %	45 à 74 %

— au contraire, entre 1702 et 1709, la probabilité de coïncidence est significativement plus grande que le hasard, et l'hypothèse d'une relation forte entre le passage d'une tache et l'apparition d'une aurore ne peut plus être rejetée, particulièrement après 1704.

Il est intéressant de noter aussi que les cinq aurores de l'année 1625 datées avec précision (Link, 1964) coïncident avec les passages de taches observées par le Père Scheiner. Connaissant la date de passage de ces taches au méridien central (Lalande, 1778) et en supposant un temps de transit de l'onde de choc de 48 heures, on peut supposer que ces cinq aurores sont probablement apparues à la suite d'éruptions chromosphériques survenues entre 0 et 30°W.

L'absence de coïncidence entre le passage des taches et l'apparition des aurores entre 1671 et 1701, tend à prouver que seule une activité de jets de vent solaire rapide devait se manifester pendant cette période. Cette hypothèse est confirmée par l'analyse de la concentration du <sup>10</sup>Be dans les glaces polaires (Beer *et al.*, 1983). Le maximum de concentration apparaît entre 1669 et 1700 (*fig. 21*) ce qui signifie que l'intensité du rayonnement cosmique galactique était élevée par suite de l'absence d'activité de chocs dont l'effet de modulation est particulièrement important comparé à celui de l'activité des jets de vent solaire rapide (Venkatesan *et al.*, 1982; Legrand et Simon, 1985, 1989; Badruddin *et al.*, 1986).

### ***Le minimum dit de Maunder et le fonctionnement de la machine solaire***

De la description de l'activité tachée et des analyses présentées précédemment, nous pouvons retenir les faits suivants :

(a) Durant la période 1610-1645, l'activité tachée était relativement importante et évoluait vraisemblablement comme les cycles que nous connaissons bien depuis leur découverte par Schwabe en 1843. La courbe de la concentration du <sup>10</sup>Be le confirme (voir *fig. 21*), ainsi que le nombre de taches visibles à l'œil nu, observées par les Chinois (Eddy, 1983).

(b) Il est impossible de se prononcer pour la période « d'incertitude » (1646-1670) par suite de l'absence totale de données sur le nombre de jours d'observations du Soleil. Les propos tenus par Picard et l'article paru dans les *Philosophical Transactions* du 14 août 1671 plaident en faveur d'une très faible activité de tache, mais il est impossible

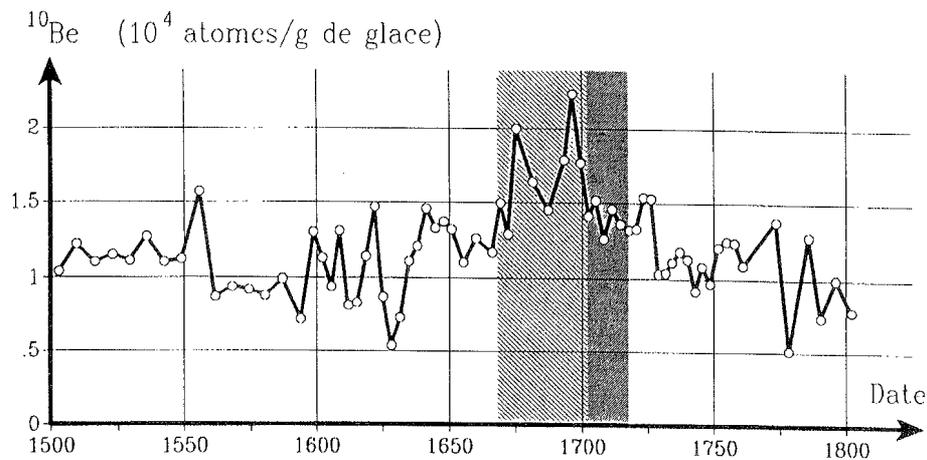


Fig. 21. — Evolution de la concentration de  $^{10}\text{Be}$  entre 1500 et 1800 (Beer *et al.*, 1983).

de l'estimer. Par contre, la concentration du  $^{10}\text{Be}$  pour cette période présente un niveau comparable à celui de l'activité tachée apparue vers 1720-1730, qui était relativement importante.

(c) Toutes les taches qui furent observées entre 1660 et 1704, étaient situées dans l'hémisphère sud du Soleil à une latitude proche de son équateur.

(d) Durant la période 1671-1710, nous disposons d'un ensemble de données qui permettent d'affirmer que l'activité tachée fut faible entre 1671 et 1689 et quasiment inexistante entre 1690 et 1700. A partir de 1702, des centres actifs commencent de nouveau à paraître sur le disque solaire.

(e) Entre 1671 et 1710, une analyse spectrale de fréquence d'apparition des taches semble montrer la présence d'un cycle de 9 ans comme ceux dont le maximum se produisit en 1769 et 1778.

(f) Ajoutons que la vitesse de rotation des taches solaires entre 1642 et 1710 a présenté des variations (Ribes *et al.*, 1987) et que le diamètre du Soleil semble montrer une augmentation moyenne de 0,2 % environ, avec une variation périodique suivant également un cycle d'environ 9 ans (Ribes *et al.*, 1989).

Tous ces résultats indiquent qu'il s'est produit une anomalie dans le fonctionnement de la « machine solaire » à partir d'une date qui se situe entre 1646 et 1670, mais qu'il est impossible de préciser. Cette anomalie se poursuivit jusqu'en 1702.

L'activité aurorale observée pendant ce siècle, ne peut pas nous renseigner valablement sur le niveau de l'activité tachée car la relation entre ces deux phénomènes déjà peu fiable (Legrand et Simon, 1989) était biaisée par les aurores provoquées par les jets de vent solaire qui, à cause de la position du pôle géomagnétique, étaient bien visibles à cette époque depuis les moyennes latitudes européennes.

Par contre, l'absence de corrélation entre les taches et les aurores entre 1671 et 1702 nous convainc que les aurores observées en Europe étaient uniquement produites par des jets de vent solaire et nous renseigne sur l'évolution du champ du dipôle solaire : la composante « toroïdale » du champ magnétique du soleil, qui représente l'activité tachée, est très étroitement liée à celle dipolaire qui la précède de 4 à 5 ans (Simon et Legrand, 1989; Legrand et Simon, 1990). On peut en déduire que le maximum d'intensité du champ dipolaire resta faible pendant les trois cycles solaires de la fin du XVII<sup>e</sup> siècle. La

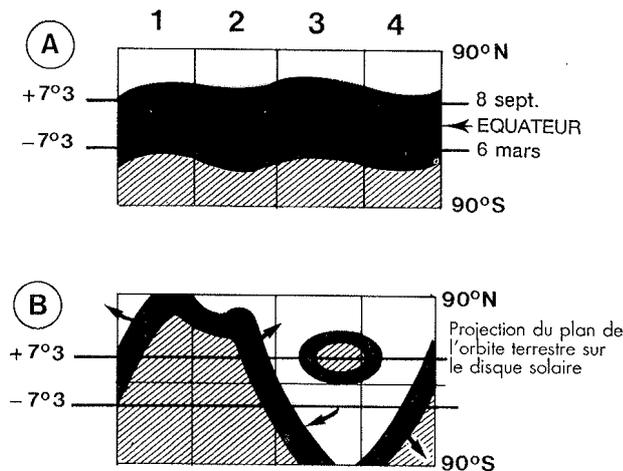


Fig. 22. — Exemples de structure de la « lame neutre » du Soleil durant la phase dipolaire (A) et la phase multipolaire (B). Cet exemple montre les positions extrêmes (6 mars et 8 septembre) du plan de l'écliptique par rapport à une « lame neutre » épaisse.

« lame neutre » était donc épaisse (*fig. 22*) et de ce fait la Terre était principalement balayée par des jets de vent solaire de faible vitesse et non par des jets rapides d'origine polaire comme c'est le cas normalement à cette période du cycle. L'activité magnétique était probablement très calme et l'ovale auroral se situait donc à des latitudes très hautes (env. 74°) (Stringer *et al.*, 1965) pendant plusieurs années consécutives, au cours desquelles pratiquement aucune aurore ne fut observée en Europe. Ce fut le cas de 1673 à 1676, de 1687 à 1690 et de 1698 à 1701. C'est au moment de la période de l'inversion des polarités du dipôle solaire, c'est-à-dire durant la phase du maximum de taches et peu après que la Terre reçut des jets de vent solaire de vitesse élevée provenant des régions contiguës à la « lame neutre » dont la structure présente, à cette phase du cycle, d'amples ondulations (*fig. 22*). Ce sont vraisemblablement ces jets qui provoquèrent les aurores observées alors en Europe.

Il peut paraître hardi de proposer un tel schéma de l'évolution du champ dipolaire à partir des seules données aurorales de moyennes latitudes (48°-54°) dont nous disposons pour cette époque. Toutefois la période de faible activité survenue au début du XIX<sup>e</sup> siècle, bien qu'un peu plus importante que celle de l'époque du Roi Soleil, nous permet de soutenir cette hypothèse (*voir annexe II*). En fait, entre 1671 et 1700, trois cycles de taches avec une périodicité proche probablement de 9 ans apparurent à la suite l'un de l'autre.

La structure de leurs taches qui se formaient uniquement dans l'hémisphère Sud, ne pouvait donner qu'une très faible activité chromosphérique.

A partir de 1702, l'activité des taches, quoique encore faible, donna naissance à des régions actives capables d'émettre des ondes de choc et la « machine solaire » reprit progressivement son rythme normal à la stupéfaction des astronomes de l'époque. L'année 1701 marquerait la fin de cette période du minimum de taches qui devrait porter le nom « de Spöcker ».

Cette période de faible activité, qui dura 30 ans, peut-être 60 ans, est unique dans l'histoire des observations télescopiques du soleil, et survint précisément au début du développement de l'astronomie physique. Il est bien certain que cette anomalie retarda la découverte du cycle de taches. Ainsi, même pour les astronomes du xviii<sup>e</sup> siècle, attelés à de nombreux et captivants travaux (mesure de l'aplatissement de la Terre aux pôles, détermination précise de la distance Terre-Soleil, établissement de catalogues d'étoiles, etc.), les taches du Soleil étaient un phénomène passager; leur apparition n'avait pas de règle, elle naissaient et disparaissaient sous les yeux mêmes de l'observateur. Ces variations les déroutaient (Bailly, 1782). « Ne vous attardez pas aux taches, disait Lalande, à un jeune débutant, c'est un phénomène qui n'a pas de loi » (Deslandres, 1906).

On ne connaît que deux autres périodes de faible activité de taches, mais dont l'amplitude des cycles était plus importante que pendant le « minimum de Maunder ». L'une eut lieu entre 1798 et 1823, l'autre entre 1878 et 1912. L'astronomie était encore limitée aux observations optiques dans le spectre visible, et le seul phénomène géophysique enregistré depuis 1847 était la variation du champ magnétique terrestre.

Toutes les connaissances actuelles sur le cycle solaire et ses répercussions sur l'environnement terrestre ont été acquises depuis l'Année Géophysique Internationale et l'avènement de l'ère spatiale (1957), au cours des quatre derniers et grands cycles de taches ( $R_{\max}$  compris entre 106 et 190). Pour l'élaboration d'un modèle fiable du fonctionnement de la « machine solaire », il nous manque manifestement des données sur le développement de petits cycles tachés, ce qui rend nécessaire la poursuite assidue des observations solaires et géophysiques, tant à partir du sol que de l'espace, en attendant l'hypothétique retour d'un Soleil *sine macula*.

## ANNEXE I

### **Le minimum de Maunder et les variations climatiques au xvii<sup>e</sup> siècle**

Plusieurs auteurs ont établi une relation entre le minimum dit « de Maunder » et le « petit âge glaciaire » (Eddy, 1976; Ribes *et al.*, 1987), alors que des études détaillées des variations climatiques survenues au cours des cinq derniers siècles, faites par Legrand (1979), Landsberg (1980) et Pfister (1980), n'ont pas révélé un abaissement permanent des températures pendant ce minimum, entre 1645 et 1715. L'ambiguïté semble provenir de la définition même du « petit âge glaciaire ». Cette dénomination s'applique généralement à la

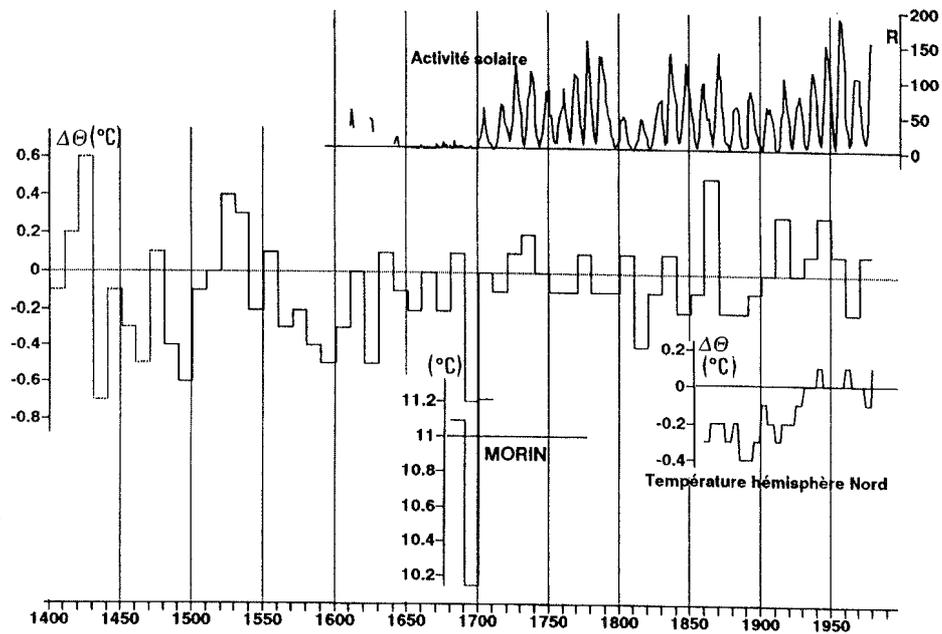


Fig. 23. — Variation de la température moyenne décennale de 1400 à 1960, reconstituée à partir des dates de vendanges et de la sévérité des hivers en Europe occidentale. En haut de la figure, sont représentés les cycles solaires, et au centre la température observée par Louis Morin à Paris, entre 1680 et 1710. La courbe placée à droite montre l'augmentation de la température de l'hémisphère Nord depuis 1850.

période de refroidissement qui débuta vers le milieu du  $xvi^e$  siècle pour se terminer vers 1700. Elle correspond à un régime météorologique faisant apparaître de grandes variations de température d'une année à l'autre et d'une ou de plusieurs décennies aux suivantes. Pour Lamb (1982), « il est raisonnable » de considérer la période allant de 1420, voire 1190, jusqu'à 1850 ou 1900, comme appartenant au développement du « petit âge glaciaire ».

Quoi qu'il en soit, la reconstitution des variations climatiques faites par Legrand (1979) à partir des dates de vendanges en France et en Suisse, et de la sévérité des hivers survenus en Europe occidentale (*fig. 23*), montre que pour les  $xvi^e$  et  $xvii^e$  siècles, l'amplitude maximum du « petit âge glaciaire » se situe entre 1550 et 1630. C'est durant cette période qu'apparut « le maximum historique » d'extension des glaciers dans toutes les Alpes (Le Roy Ladurie, 1967, Pfister, 1988). Un autre refroidissement très marqué survint entre 1690 et 1700. Il est confirmé par les mesures de températures faites à Paris par Louis Morin (Legrand et Le Goff, 1987). Ainsi, seul ce dernier bref et intense refroidissement trouve une place au cœur du Minimum dit de Maunder. Il coïncide d'ailleurs avec la période d'activité solaire la plus faible. Mais il paraît hasardeux de déduire une relation entre les deux phénomènes puisque l'amplitude maximum du « petit âge glaciaire » eut lieu pendant une période d'activité solaire relativement soutenue, comme l'ont montré Legrand, Le Goff et Mazaudier (1990 *b*).

## ANNEXE II

### Comparaison de la période de faible activité de la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle avec celle du début du XIX<sup>e</sup> siècle

La reconstitution des cycles de taches faite par Wolf pour le XVIII<sup>e</sup> siècle et le début du XIX<sup>e</sup> siècle fait apparaître une période de faible activité entre 1798 et 1822 comportant deux petits cycles dont les maximums en 1804 ( $R_{\max} = 47,5$ ) et en 1816 ( $R_{\max} = 45,8$ ) sont comparables au cycle de 1705 ( $R_{\max} = 53$ ).

Au cours de cette période où l'activité tachée est plus élevée que pendant celle de la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle (1671-1700), le nombre d'aurores observées en Europe à une latitude égale ou inférieure à 55° (Fritz, 1873) n'a été seulement que de 124 durant 25 années soit en moyenne 5 aurores/an. Cette moyenne est particulièrement basse entre 1807 et 1813 puisqu'elle est proche d'une aurore/an (fig. 24). Elle est comparable à celle du niveau de l'activité aurorale entre 1671 et 1700. Le Père Cotte (1808) avait remarqué cet affaiblissement : « ...depuis 1790, nous sommes dans une période de la disparition de l'aurore boréale qui s'est fait voir très rarement depuis cette époque. »

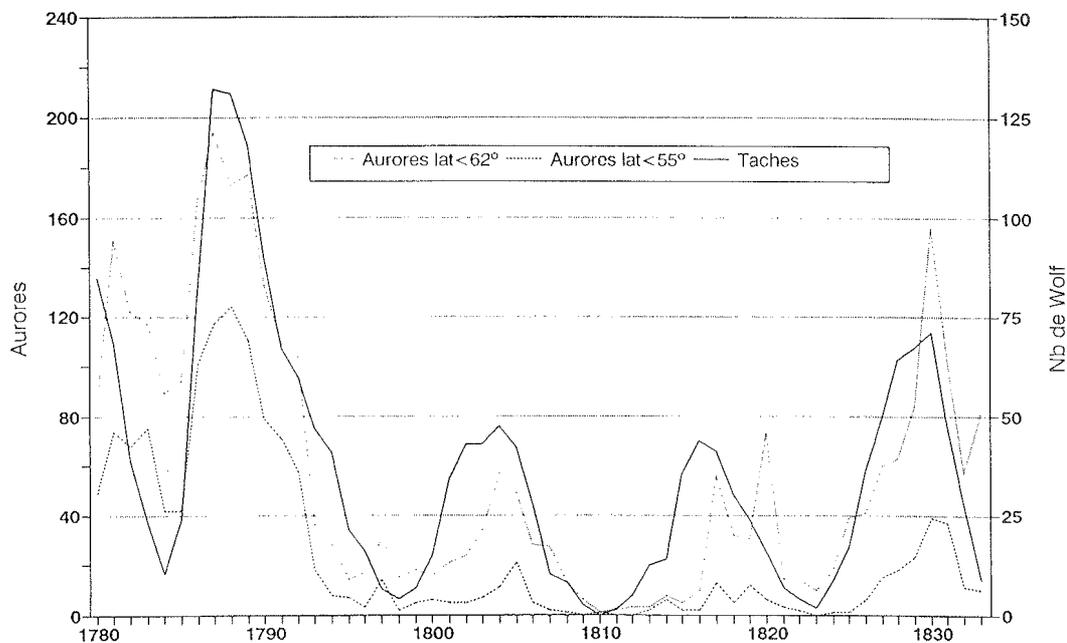


Fig. 24. — Exemple de comparaison des activités aurorales et tachées pendant une époque de faible activité au XIX<sup>e</sup> siècle. La courbe en trait tireté représente la proportion de l'activité aurorale visible en Europe au-dessous de 55° de latitude. Par comparaison, la fréquence aurorale observée en Europe au-dessous de  $\Phi = 62^\circ$  est dessinée en trait pointillé.

Sur la figure 24 nous avons également porté la courbe de la fréquence d'apparition des aurores à une latitude géomagnétique égale ou inférieure à  $62^\circ$ , établie par Legrand et Simon (1987), à partir de données homogènes. D'après les remarques notées précédemment sur les conditions d'observation des aurores, les maximums de cette courbe correspondent à des aurores produites principalement par des jets de vent solaire de vitesses relativement élevées provenant des régions contiguës à la « lame neutre » et des trous coronaux polaires. Les premiers balayent la Terre au moment du retournement du dipôle solaire proche du maximum de taches (1814 et 1817) et les seconds lorsque le dipôle atteint son maximum d'intensité (1807 et 1820). Les aurores disposées sur un diagramme de Bartels présentent une nette récurrence à 27 jours durant les années proches de ces maximums ce qui apporte une confirmation supplémentaire quant à leur origine.

Le petit nombre d'aurores apparues en 1807 à  $62^\circ$  de latitude géomagnétique indique que le maximum d'intensité du champ dipolaire fut faible annonçant ainsi le développement du petit cycle de taches de 1816. A la structure d'un tel champ correspondait une « lame neutre » épaisse dans laquelle baigna la Terre pendant plusieurs années consécutives. L'activité magnétique resta donc très basse de 1809 à 1815 ce qui se traduisit par la disparition quasiment complète des aurores aux latitudes égales ou inférieures à  $55^\circ$ .

Par contre, en 1820, l'activité aurorale était importante. Elle correspondait à un maximum du champ dipolaire plus intense qui était le signe annonciateur du cycle de 1830 dont le maximum ( $R_{\max}$ ) atteignit 71.

#### NOTES

(<sup>1</sup>) On appelle « nombre relatif de Wolf » un indice de l'activité des taches solaires, introduit par Wolf en 1849, et qui se calcule par la formule  $R = K(10g + f)$ , où  $g$  est le nombre de groupes de taches et de taches isolées,  $f$  le nombre total de taches et  $K$  un facteur voisin de 1, dépendant de l'observateur et de son instrument. Cet indice, qui est globalement proportionnel à la surface tachée du disque solaire, est plus significatif que le simple décompte des taches.

(<sup>2</sup>) Pour déterminer le lieu d'apparition des taches sur la surface du Soleil, Carrington a défini un méridien solaire origine : c'est le méridien central du Soleil qui est passé par le nœud ascendant de l'équateur solaire sur l'écliptique le 1<sup>er</sup> janvier 1854 à 12 h TU. La période de rotation sidérale du Soleil étant de 25,38 jours, la rotation synodique est comprise entre 27,20 et 27,33 jours suivant la position de la Terre sur son orbite. On en déduit la longitude journalière du méridien solaire central.

(<sup>3</sup>) L'étude faite par Trellis porte sur quelques dizaines de milliers de passages de taches de 8 cycles solaires.

#### BIBLIOGRAPHIE

- Badrudhin R., Yadav S., Yadav N. R., 1986, *Sol. Phys.*, **105**, 413-428.
- Bailly J. S., 1779-1782, Histoire de l'astronomie depuis la fondation de l'école d'Alexandrie jusqu'à l'époque de 1782, Paris.
- Beer J., Andrée M., Oeschger H., Strauffer B., Bonani C., Stoller C., Stuter M., Wölfi W., Finkel R. C., 1983, *Radiocarbon*, **25**, 269-278.
- Bigourdan G., 1928, Observations inédites de taches solaires faites à l'Observatoire de Paris de 1683 à 1719 par Ph. La Hire et G. Ph. La Hire. *Mémoire Acad. Sci.*, 59, 1-44.
- Champion D. E., 1980, Holocene geomagnetic secular variation in the western United States : implications for the global geomagnetic field. Rept. Open file series, *U.S. Geol. Surv.*, 314, 80-824.
- Cotte L., 1808, Manuscrit 548, n° 21-2, Bibliothèque municipale de Laon, 22 septembre.
- Danjon A., Couder A., 1935, Lunettes et Télescopes, Paris.
- Deslandres H., 1906, Annuaire du Bureau des Longitudes pour 1907, Paris.

- Eddy J. A., 1976, *Science*, **192**, 4245, 1189-1202.
- Eddy J. A., 1983, *Sol. Phys.*, **89**, 195-207.
- Fritz H., 1873, Polarlichter.
- Gleissberg W., Damboldt Th., 1979, *J. Brit. Astron. Assoc.*, **89**, 5, 440-449.
- Hevelius, Selenographia, 1647.
- King H. C., 1979, The history of the telescope, London.
- Kopecky M., Kuklin G. V., 1987, *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, **38**, 193-200.
- Lalande J., 1776, *Hist. Acad. Sci.*
- Lalande J., 1778, *Hist. Acad. Sci.*
- Lamb H., 1982, Climate history and the modern world, London.
- Landsberg H. E., 1980, *Arch. Met. Geoph. Biok. Ser.*, **B28**, 181-191.
- Legrand J.-P., 1979, *La météorologie*, VI (16), 167-182.
- Legrand J.-P., 1979, *Revue Française d'annologie*, **75**, 23-50.
- Legrand J.-P., 1990, Les aurores de moyenne et basse latitudes, à paraître en 1991.
- Legrand J.-P., Le Goff M., 1987, *La Vie des Sciences*, (3), 251-281.
- Legrand J.-P., Le Goff M., Mazaudier C., 1990 a, *Ann. Geophysicae*, **8**, (10), 637-644.
- Legrand J.-P., Le Goff M., Mazaudier C., 1990 b, Document de travail CNET-CNRS, DT/CRPE/1195.
- Legrand J.-P., Simon P.-A., 1985, *Astron. Astrophys.*, **152**, 199-204.
- Legrand J.-P., Simon P.-A., 1987, *Ann. Geophysicae*, **5A**, 161-168.
- Legrand J.-P., Simon P.-A., 1988, *J. Brit. Astron. Assoc.*, **98**, 6, 311-312.
- Legrand J.-P., Simon P.-A., 1989, *Ann. Geophysicae*, **7A**, (6), 565-578.
- Legrand J.-P., Simon P.-A., 1990, *Solar Physics*, **131**, 187-209.
- Le Roy Ladurie E., 1967, Histoire du climat depuis l'an mil, Flammarion, Paris.
- Link F., 1964, *Geophysikalni Sbornik*, **212**, 501-547.
- Link F., 1978, *Solar Physics*, **59**, 175-178.
- Maraldi J.-Ph., 1695, Manuscrit B4-8, Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.
- Martres M.-J., 1987, Communication privée.
- Maunder E. W., 1922, The prolonged sunspot minimum 1645-1715, *Brit. Astron. Assoc. J.*, **32**, 140-145.
- Morice E. et Chartier F., 1954, Méthode statistique, Paris.
- Pfister Ch., 1980, *J. Interdiscipl. Hist.*, X :4, 665-696.
- Pfister Ch., 1988, *Hist. Mesure*, III-3, 313-358.
- Pingré, A.-G., 1901, Les Annales Célestes du XVIII<sup>e</sup> siècle publiées par Bigourdan, Paris.
- Ribes E., Ribes J.-C., Bartholot R., 1987, *Nature*, **325**, 5.
- Ribes E., Merlin Ph., Ribes J.-C., Bartholot R., 1989, *Ann. Geophysicae*, **7**, (4), 321-330.
- Sakurai K., 1980, *J. History Astron.*, XI, 164-173.
- Scheiner P., 1630, *Rosa Ursina*.
- Schröder W., 1979, *J. Atmosph. Terrest. Phys.*, **41**, 445-446.
- Schröder W., 1988, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 1988, **38**, 246-251.
- Schröder W., 1989, 1990, Communications privées.
- Shirley J. W., 1974, Thomas Harriot, Renaissance Scientist, Oxford.
- Simon P.-A., Legrand J.-P., 1989, *Ann. Geophysicae*, **7A**, (6), 579-594.
- Simon P.-A., Legrand J.-P., 1990, *L'astronomie*, 363-372.
- Spoerer F. W., 1889, Ueber die Periodicität der Sonnenflecken seit den Jahre 1618, Royal Leopold Caroline Academy.
- Stringer W. J., Belon A. E., 1967, *J. Geoph. Res.*, **72**, 1, 245-250.
- Stringer W. J., Belon A. E., Akasofu S. I., 1965, *J. Atmosph. Terrest. Phys.*, **27**, 1039-1044.
- Tarde J., 1622, Les astres de Bordon et apologie pour le soleil. Monstrant et vérifiant que les apparences qui se voyent dans la face du soleil sont des planètes et non des taches, comme quelques italiens et allemands observateurs d'icelles luy ont imposés, Paris.
- Trellis M., 1971, *C.R. Acad. Sci. Paris*, **272**, série B, 1026-1028.
- Venkatesan D., Shukla A. K., Agrawal S. P., 1982, *Solar Phys.*, **81**, 375-381.
- Waldmeier M., 1961, The sunspot activity in the years 1610-1960, Zurich.
- Wolf Ch., 1902, Histoire de l'Observatoire de Paris, de sa fondation à 1793, Paris.
- Young C. A., 1883, Le Soleil, Paris.
- Zhen-Tao Xu, 1982, Chinese ancient sunspot records and the variability of solar activity, Communication privée.