

CHAPITRE 6

Le cycle solaire

6.1 Le cycle des taches

Nous avons décrit, au chapitre 3, les caractéristiques des taches solaires et mentionné leur lien avec le flux centimétrique et avec les émissions en rayons X, issus des boucles de champ magnétique qui les surplombent. Nous avons aussi défini l'indice des taches, appelé RI (*indice relatif international des taches*). Bien qu'il soit issu d'un simple comptage, sa comparaison avec la surface tachée et le flux centimétrique montre la pertinence de cet indice vis-à-vis de mesures plus physiques, mais plus récentes. En effet, comme l'indice relatif des taches est disponible, sans interruption, depuis 1700 en valeurs annuelles, depuis 1750 en valeurs mensuelles et depuis 1849 en valeurs quotidiennes, il joue par sa durée, un rôle central dans l'étude du cycle solaire de onze ans.

Les paramètres du cycle des taches sont définis conventionnellement sur les *valeurs mensuelles moyennées* sur douze mois, indice appelé RI_{12} , dont on calcule la valeur mensuelle en utilisant une moyenne glissante centrée :

$$RI_{12} = \frac{1}{12} \left(\sum_{m=-5}^{m=+5} RI_m + \frac{RI_{-6}}{2} + \frac{RI_{+6}}{2} \right)$$

Ce calcul nécessite de connaître les moyennes mensuelles observées, RI_m , sur 13 mois, puisque les mois extrêmes, RI_{-6} et RI_{+6} ne comptent que pour moitié. La figure 6-1 montre, dans le cadre supérieur, les valeurs quotidiennes de RI sur 6 ans, du minimum au maximum du cycle 19, le plus intense des cycles observés jusqu'à présent. On note combien les fluctuations des valeurs quotidiennes sont importantes. Les moyennes mensuelles, indiquées par des rectangles dans le cadre du bas, présentent aussi, dans certains cas, de brusques sauts. La courbe du RI_{12} montre qu'il faut effectivement sommer sur une année pour que l'indice des taches apparaisse comme une courbe régulière en période de forte activité.

Il est important d'examiner l'aspect conventionnel des paramètres généralement utilisés pour quantifier les cycles. On ne doit pas, par exemple, attribuer trop

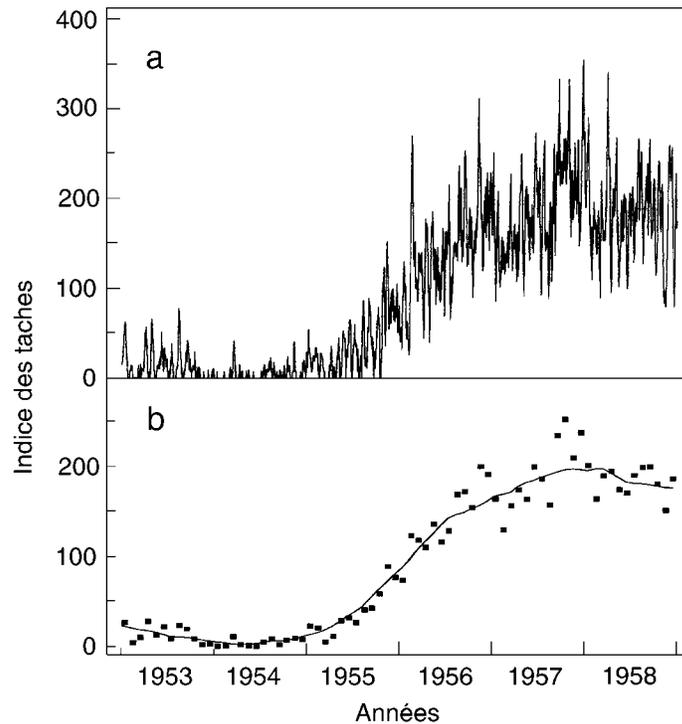


Figure 6-1 : Comparaison, du minimum au maximum d'un cycle, a) de l'indice RI quotidien, b) de l'indice moyen mensuel (RI_m) ou moyenné sur 12 mois (RI_{12}).

d'importance au mois précis du minimum ou du maximum, et ceci pour plusieurs raisons. Les différents observatoires, dans leurs observations quotidiennes, ne décomptent pas le même nombre de taches, pour des raisons d'instrument, de conditions de visibilité, d'équation personnelle et d'heure d'observation. Malgré la péréquation sur une quarantaine d'observatoires, faite lors du calcul de l'indice RI, une certaine incertitude subsiste. En effet, d'après la définition du nombre de Wolf, à deux taches proches vues sur le Soleil on attribue une contribution de 12 (soit $10 + 2$) ou de 22 (soit $20 + 2$), suivant qu'on les relie au même groupe ou non. Cette incertitude, non négligeable au niveau de chaque observatoire, est particulièrement sensible durant le minimum du cycle. Or, tous calculs faits, on constate que les indices RI_{12} de certains mois de minimum sont extrêmement proches entre eux. C'est le cas, entre les cycles 20 et 21, pour mars 1976 ($RI_{12} = 12,17$) et juin 1976 (12,24) ou bien entre les cycles 21 et 22, pour mars 1986 ($RI_{12} = 12,96$) et pour septembre 1986 (12,31). Peu de choses auraient donc suffi pour que la date officiellement retenue pour le minimum se déplace de trois mois dans le premier cas et de six mois dans le second.

Plus fondamental encore est évidemment le choix de l'indice. La figure 6-2, compare, pour le cycle 21, le flux en rayons X (noté X), celui à 10,7 cm (noté F) et celui de l'indice RI_{12} (noté R). Les ingrédients de ce dernier indice, nombre de taches individuelles (N) et nombre de groupes (G) sont également tracés. Pour chacune des courbes, les triangles indiquent la date des minima et des maxima et montrent la grande dispersion des époques correspondantes. Avec deux indices dont les variations sont pourtant très bien corrélées, comme le RI_{12} et le flux centimétrique correspondant (leur coefficient de corrélation est de 0,996), les maxima trouvés sont en décembre 1979 pour le premier et en mai 1981 pour le second.

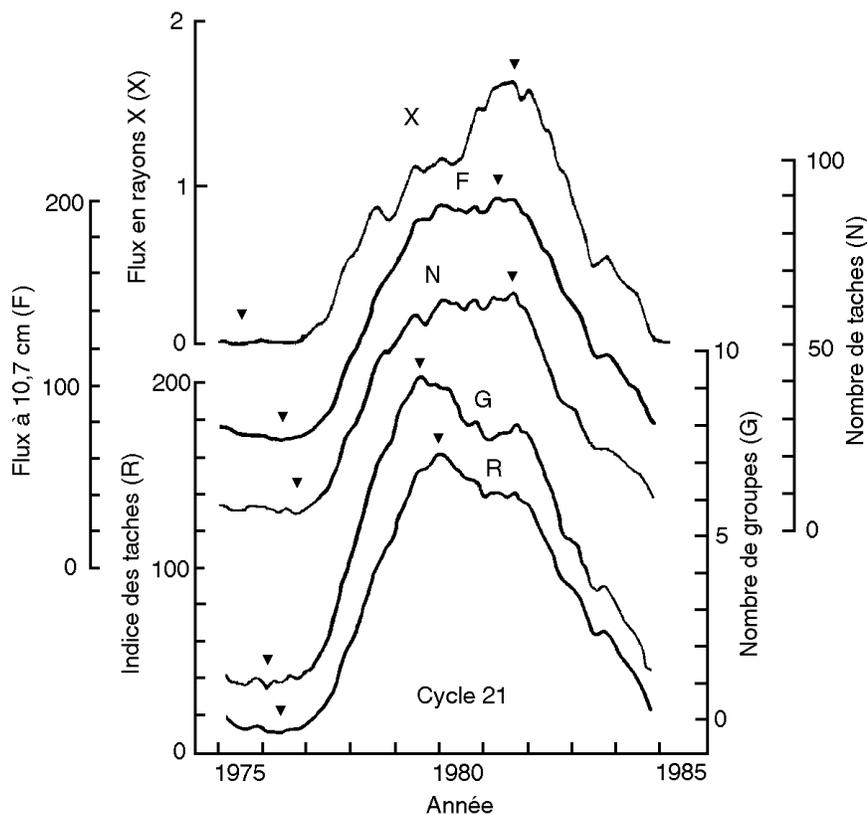


Figure 6-2 : Comparaison d'un cycle de onze ans en rayon X, en centimétrique, en nombre de taches et de groupes, et en indice des taches (RI_{12}).

Les différents cycles observés depuis la fin du XVII^e siècle sont tracés sur la figure 6-3 en terme d'indice des taches (les paramètres des cycles sont donnés en annexe). Cette figure montre la présence, depuis 1700, de trois séries de cycles, centrées approximativement sur le milieu de chaque siècle. Dès la première moitié du XIX^e siècle, on a suggéré l'existence d'une période de 80 ans, appelée fréquemment période de Gleissberg. Cette période est restée assez stable jusqu'au milieu du XX^e siècle, mais au fur et à mesure que de nouveaux cycles, particulièrement intenses, sont observés, cette période tend à s'allonger, de telle sorte qu'aujourd'hui cette période est plutôt de 100 ans, comme l'illustre, sur la figure 6-3, la sinusoïde en trait plein que l'on peut comparer à celle, indiquée en pointillés, dont la période est de 80 ans. Si le cycle 23 atteint un niveau semblable à ses deux prédécesseurs, comme on le prévoit actuellement (voir section 6.5), la période dominante de l'enveloppe des cycles sera encore un peu plus longue. Cela montre la difficulté de prouver l'existence d'une périodicité stable lorsque la durée des observations est aussi restreinte à l'échelle de cette période. Pourtant l'analyse des radio-isotopes cosmogéniques suggère que cette période subsiste bien à long terme. Si le carbone 14 est moins précis à cet égard puisque, comme nous le verrons dans la section 6.9, il séjourne une centaine d'années dans l'atmosphère, le béryllium 10, qui n'y séjourne qu'un an, atteste l'existence d'une période statistiquement significative de 92 ans dans une carotte de glace du Pôle Sud.

Une autre caractéristique des cycles de taches est liée à leur parité. Un examen de la figure 6-3 montre que les cycles impairs ont généralement une amplitude de 40 unités supérieure à celle du cycle pair que les précède. Si l'on considère les cycles à partir de 1750, période pour laquelle les valeurs mensuelles sont considé-

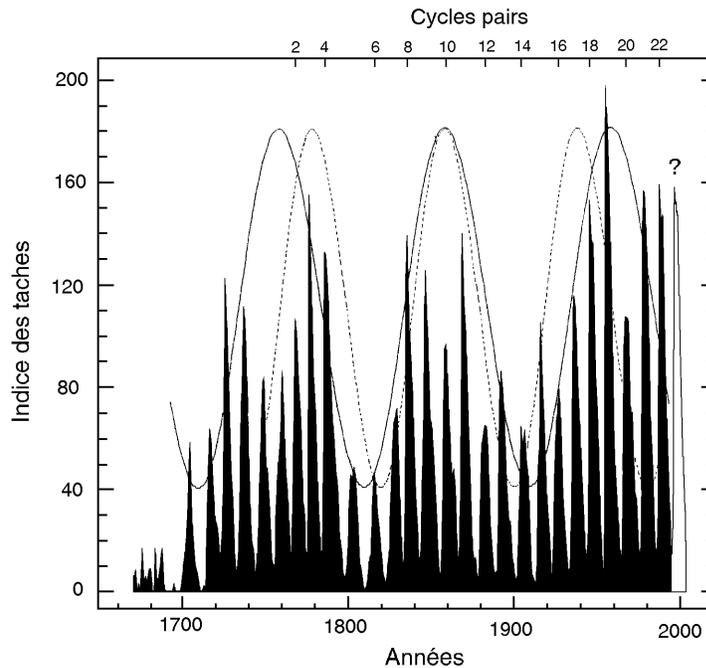


Figure 6-3 : Cycles des taches du XVII^e au XX^e siècles, comparés à des périodes de 80 et 100 ans.

rées comme fiables, on voit que sur 11 couples de cycles, cette règle empirique s'est appliquée neuf fois, les exceptions correspondant aux cycles numérotés 4 et 5 d'une part, 8 et 9 d'autre part. Un effet de la parité du cycle n'est pas quelque chose de tout à fait inattendu car lorsque la polarité du champ magnétique est prise en compte, c'est une période de 22 ans que l'on doit considérer. En effet la polarité des taches d'un groupe bipolaire, pour un cycle de numéro impair, est nord pour la tache de tête et sud pour celle de queue dans l'hémisphère Nord. Lors du cycle suivant la polarité des taches correspondantes s'inverse. Les champs magnétiques polaires s'inversent aussi à chaque cycle, mais au moment du maximum des taches cette fois, comme nous le verrons plus loin. Certains ont déduit de la relation mentionnée plus haut, entre parité et amplitude, la prévision d'un cycle 23 très intense, puisque le cycle 22 a déjà atteint environ 160, mais cette règle ayant eu 20 % d'exceptions par le passé, les spécialistes lui préfèrent l'observation de précurseurs du cycle, comme le géomagnétisme, dont nous reparlerons à la section 6.5.

La figure 6-3 montre aussi une troisième caractéristique des cycles de taches. Avant l'année 1700 se situe un épisode de très faible activité, tout à fait particulier, connu sous le nom de « *Minimum de Maunder* ». Durant cette période très peu de taches ont été observées, bien que de grands observatoires européens aient déjà été fondés et que les astronomes se soient préoccupés d'étudier l'activité solaire. La réalité du Minimum de Maunder a fait l'objet de nombreuses discussions, les documents européens et chinois semblant diverger à cet égard. Néanmoins, une fois encore, les radioéléments cosmogéniques apportent un argument essentiel en faveur de l'existence, non seulement du Minimum de Maunder, mais aussi de périodes plus anciennes (appelées périodes de Wolf au XIV^e siècle et de Spörer au XV^e et XVI^e siècles), de très faible activité solaire. Le lecteur pourra se reporter à la figure 6-16 de ce chapitre.

L'existence de ces phénomènes est évidemment fondamentale pour comprendre la nature de la dynamo solaire, responsable de la régénérescence périodique du

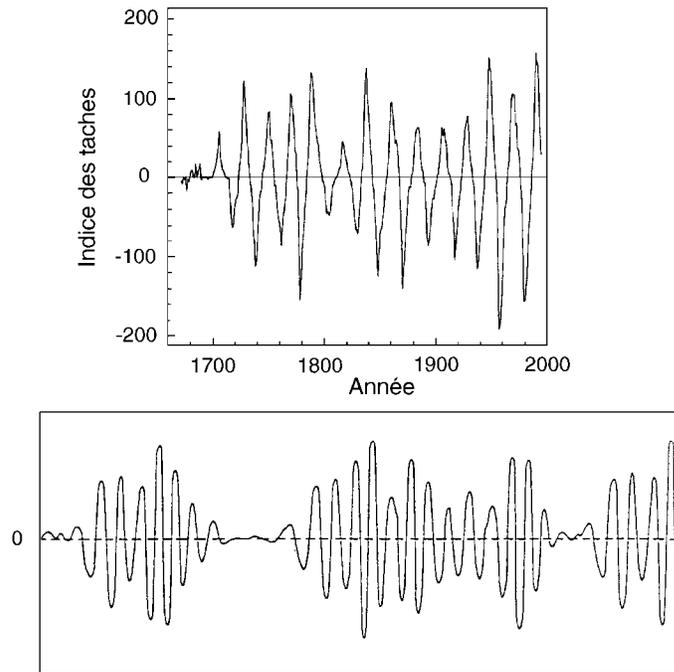


Figure 6-4 : Cycle des taches observé (en haut), comparé à un modèle cyclique avec périodes chaotiques.

champ magnétique. De telles variations de l'activité solaire peuvent être attribuées soit à la nature aléatoire de cette dynamo, soit à un phénomène déterministe, mais chaotique (encadré 6.I). La figure 6-4 illustre ce dernier cas. Sont tracés, dans la partie haute de la figure, les cycles solaires observés depuis la fin du XVII^e siècle, inversés une fois sur deux, les cycles impairs étant négatifs, pour mettre en évidence la périodicité fondamentale de 22 ans. On peut comparer ce tracé à celui du bas de la figure, résultant d'un modèle mathématique simple qui devient sporadiquement chaotique (ici durant trois époques de faible amplitude). On constate la grande analogie entre l'allure générale des deux courbes. Durant les époques où le système devient chaotique, on sait que la *phase* de l'oscillation est perdue, de telle sorte que l'oscillateur, cet épisode passé, repart avec la même période d'oscillation, mais avec des cycles découplés. Les cycles solaires précédant le Minimum de Maunder sont actuellement trop mal connus pour que l'on puisse trancher à l'égard de ce critère. Ici aussi, les mesures du béryllium 10 devraient, dans le futur, apporter des éléments décisifs. L'analyse de l'éventuelle nature chaotique de l'activité solaire à plus courte échelle de temps a été maintes fois tentée. Les travaux à mon avis les plus sérieux montrent que l'on ne peut pas, dans l'état actuel des choses, réellement conclure.

6.2 Le cycle du flux total

Le cycle des taches a-t-il un effet sur le rayonnement total du Soleil dont nous avons déjà parlé dans le chapitre consacré à la photosphère ? Bien que les astronomes du XIX^e siècle en aient été persuadés, à une époque où la précision des mesures donnait un flux total constant (la *constante solaire*), il a fallu attendre l'envoi, à partir de 1979, de satellites porteurs d'instruments spécialisés, pour connaître la réponse. La figure 6-5 donne les résultats obtenus par trois de ces

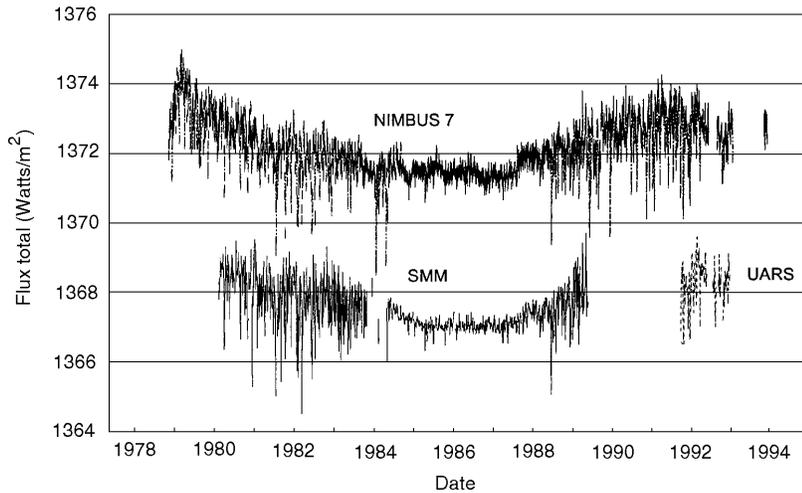


Figure 6-5 : Mesure du flux total du Soleil par trois satellites différents.

satellites. Elle confirme que les variations sont extrêmement faibles au cours du cycle solaire. Elle montre aussi que, contrairement à ce que l'on pourrait penser (puisque les taches sont moins brillantes que le reste de la photosphère), le flux total est moindre au moment du minimum des taches qu'au moment du maximum. Les différentes observations sont en accord sur l'amplitude de la variation au cours du cycle : la variation moyenne entre maximum et minimum des taches est de l'ordre du millième du flux. Les diverses expériences donnent, par contre, des valeurs légèrement différentes du flux total, ce qui n'est guère étonnant lorsque l'on connaît la difficulté d'un étalonnage absolu d'instruments embarqués à bord de satellites. L'analyse détaillée de ces résultats a montré que les taches jouent un rôle relativement important mais qu'il était contrebalancé, entre autre, par celui des facules, plus brillantes que le reste de la photosphère.

6.3 Les caractéristiques du cycle liées à la latitude

Outre le nombre de taches présentes sur le disque, un autre effet du cycle, facilement observable, est lié aux latitudes auxquelles les taches apparaissent. Du début à la fin du cycle, les taches migrent de 40° à 10° environ. La figure 6-6 illustre cet effet, pour cinq cycles, sous la forme d'un « *diagramme papillon* ». Le cadre du bas donne la surface tachée pour chaque rotation de Carrington ainsi que la courbe lissée sur 12 mois.

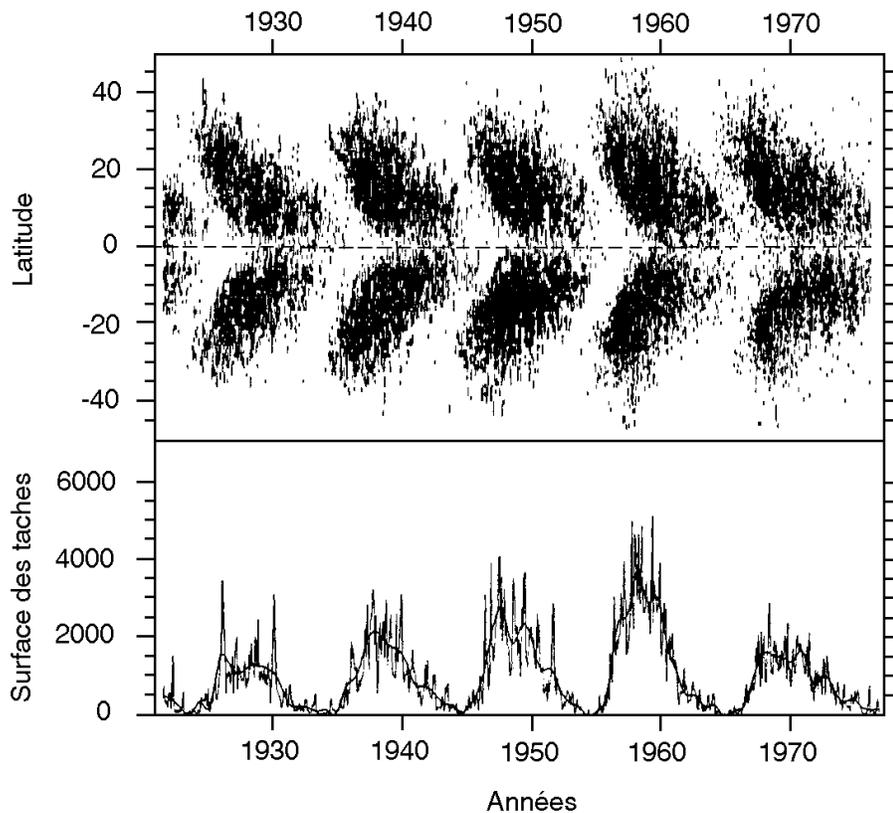


Figure 6-6 : Diagramme papillon sur cinq cycles de onze ans dont les surfaces tachées moyennes mensuelles sont données dans le cadre du bas.

Au moment du minimum du cycle, les taches des deux cycles coexistent, les unes à basses latitudes, les autres à hautes latitudes, comme le montre la figure 6-7 qui correspond au dernier minimum de la figure précédente. La latitude et la polarité des taches de tête et de queue, inversée d'un cycle à l'autre et d'un hémisphère à l'autre, permettent d'identifier les premières taches d'un cycle. On note que ces taches apparaissent dans l'hémisphère Nord environ un an et demi

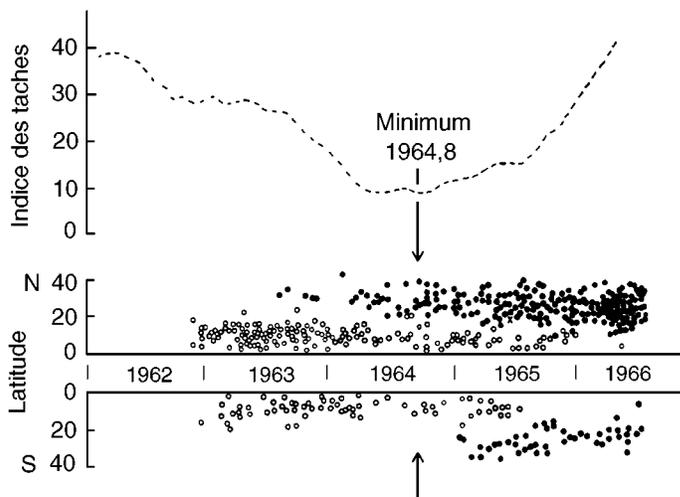


Figure 6-7 : Indice des taches et diagramme papillon durant le minimum séparant les cycles 19 et 20. Les taches du cycle 19 sont indiquées par des cercles, ceux du cycle 20 par des points.

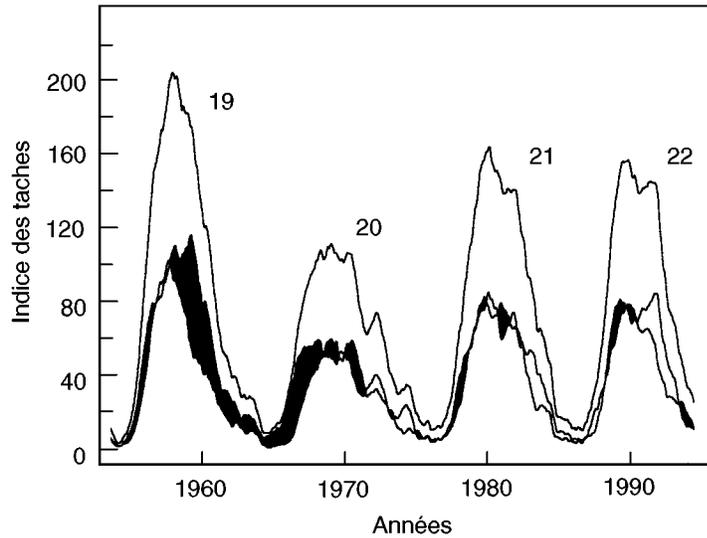


Figure 6-8 : Dissymétrie Nord-Sud de l'activité solaire. La courbe du haut est l'indice RI_{12} . Les indices correspondant à chaque hémisphère sont tracés au-dessous. L'écart entre ces tracés est en noir quand l'hémisphère Nord domine.

avant le minimum de 1964, tandis que les taches de l'ancien cycle continuent à apparaître, au-delà du minimum, durant un temps similaire. Une analyse plus fine des polarités des taches semble montrer, qu'à raison de quelques exemples par an, on trouve des régions actives à polarités inversées dès le maximum d'un cycle. De même on continuerait à observer, jusqu'au maximum du suivant, quelques groupes de taches correspondant, en terme de polarités, à l'ancien cycle.

Sur la figure 6-7 on note un écart important, d'un an et demi, entre l'apparition des taches du nouveau cycle dans l'hémisphère Nord dans l'hémisphère Sud. Les dissymétries du nombre de taches entre les deux hémisphères sont relativement fréquentes. Elles peuvent exceptionnellement se prolonger sur des années, comme le montre la figure 6-8, où sont représentés, pour quatre cycles, l'indice RI_{12} ainsi que les contributions à cet indice des hémisphères Nord et Sud, calculées par l'Observatoire de Bruxelles. Lorsque l'hémisphère Nord domine, la différence est indiquée en noir. Pendant une période extrêmement longue, du maximum du cycle 19 à celui du cycle 20, durant plus de onze ans donc, l'hémisphère Nord reste le plus actif, avec fréquemment un indice deux fois plus élevé que celui de l'hémisphère Sud. Des études portant sur l'ensemble des données disponibles (remontant à 1875 grâce aux observations de Greenwich), montrent qu'une période d'une durée de 80 ans environ semble exister dans l'asymétrie nord-sud. Malgré ces écarts, l'amplitude des deux cycles reste néanmoins similaire et l'on retrouve dans les cycles hémisphériques les cycles forts ou faibles de l'activité totale. Les activités des deux hémisphères, au cours d'un cycle, restent donc intimement liées, tout en gardant une certaine indépendance. Notons d'ores et déjà que les modèles actuels ne rendent pas compte de cette relation complexe entre hémisphères.

6.4 Le cycle du champ magnétique coronal à grande échelle

Lorsqu'au lieu de s'intéresser aux taches, donc aux champs magnétiques les plus intenses, on observe au contraire le champ magnétique faible à plus grande échelle (présenté aux sections 3.4.3 et 4.1.5), on met en évidence un cycle très

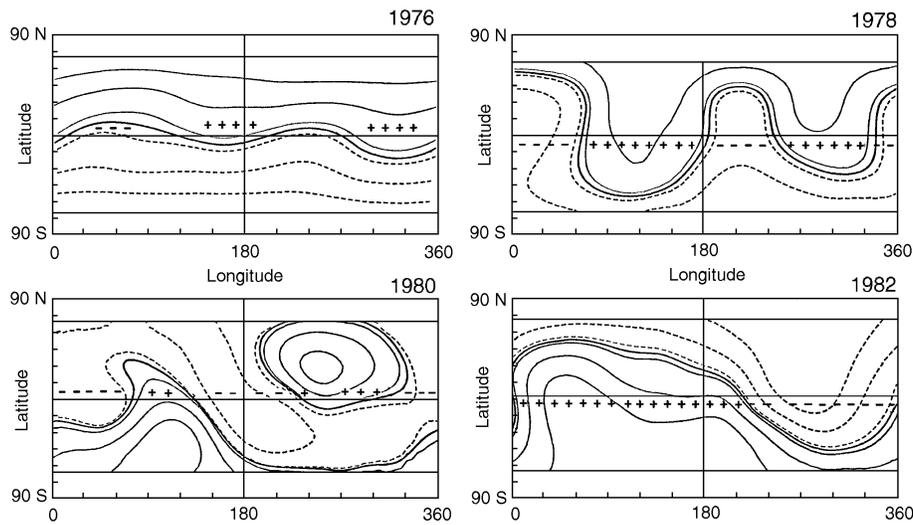


Figure 6-9 : Cycle du champ magnétique à grande échelle. En haut, durant le minimum et la phase de croissance du cycle des taches. En bas, durant le maximum et la décroissance du cycle des taches.

différent de celui des taches. La figure 6-9 représente quatre cartes synoptiques du champ magnétique à grande échelle extrapolé à partir de mesures photosphériques. Ces cartes sont de nature identique à la figure 4-8c, bien que la représentation choisie diffère. Chaque carte est séparée de la précédente par deux ans environ. La première, correspondant à une rotation de Carrington de 1976, est typique du minimum du cycle des taches. La ligne neutre principale est quasiment équatoriale. La polarité du champ magnétique est ici positive dans l'hémisphère Nord, négative au sud. Sur la seconde carte, correspondant à la montée du cycle des taches, en 1978, la ligne neutre principale oscille fortement du nord au sud. Les polarités restent les mêmes que précédemment, au-dessus et au-dessous de la ligne neutre. La troisième carte, obtenue durant le maximum du cycle des taches, en 1980, est plus complexe. Deux lignes neutres principales distinctes coexistent. L'une, dans le quadrant en haut et à droite de la figure, correspond à celle observée durant les périodes précédentes, ainsi que la polarité du champ magnétique en fait foi. Elle s'est déjà refermée sur elle-même et disparaîtra au cours des rotations suivantes. L'autre, qui n'existait pas auparavant, couvre l'ensemble des longitudes. On note que la polarité du champ est, cette fois, négative au nord de cette ligne neutre et positive au sud. La quatrième carte synoptique enfin, correspond à la période de décroissance du cycle des taches, en 1982. La nouvelle ligne neutre reste seule présente. Elle oscille fortement d'un hémisphère à l'autre et ne deviendra équatoriale qu'en fin de cycle, en 1986. Rappelons ici, pour faciliter la compréhension de la suite, que les trous coronaires, durant les trois ou quatre dernières années du cycle, sont stables et descendent fréquemment à basse latitude. A grande échelle, ce sont des régions unipolaires qui viennent se placer, sur une carte synoptique, dans les sinuosités de la ligne neutre.

Les polarités du champ magnétique figuré sur les deux dernières cartes montrent qu'il y a eu inversion du champ à grande échelle au moment du maximum du cycle des taches. Cette orientation du champ va rester identique jusqu'au maximum du cycle des taches suivant. Contrairement aux polarités des taches, qui s'inversent au moment du minimum, celles du champ à grande échelle le fait au moment du maximum du cycle. Cela montre que le cycle solaire pris dans sa globalité est plus complexe que celui des taches seules. La meilleure synthèse actuelle met en jeu le concept de *cycle étendu* dont la durée dépasse, nous allons le

voir, les onze ans. Nous devons cependant inclure ici une section concernant le cycle observé sur les données de géomagnétisme car c'est historiquement l'un des premiers éléments ayant conduit à la notion de cycle étendu. La possibilité de prévoir la valeur du maximum d'un cycle de taches, avant même que ce cycle ne commence, reste l'une des meilleures démonstrations, je crois, de la pertinence de ce concept.

6.5 Le cycle et l'activité géomagnétique

L'activité géomagnétique, dans ses manifestations les plus extrêmes, les orages géomagnétiques, est liée d'une part aux phénomènes éruptifs du Soleil et d'autre part aux trous coronaux. Dans les deux cas, la magnétosphère est perturbée par les variations rapides des paramètres du vent solaire. Comme les taches, le géomagnétisme est observé depuis longtemps d'une manière fiable, en ce qui concerne l'activité globale, qui nous intéresse ici. On peut ainsi analyser sur onze cycles, la relation entre les indices de taches et les indices géomagnétiques les plus anciens, les indices Aa, disponibles à partir de l'année 1868. Contentons nous de comparer les quatre derniers cycles. La figure 6-10 donne le profil temporel des cycles 19, 20, 21 et 22 de l'indice géomagnétique Aa en regard des cycles de taches. Les maxima et minima de ces derniers cycles sont reportés sur la courbe de l'indice géomagnétique. On constate, à l'évidence, la grande irrégularité de cette courbe. Les maxima des cycles de taches correspondent cependant à des périodes d'activité géomagnétique intense en raison de la contribution des éruptions. La seule exception correspond au maximum de 1980, année où l'indice géomagnétique est extrêmement bas, ce qui est d'ailleurs un cas unique dans la série, longue de 130 ans, des indices Aa. Au minimum du cycle des taches on observe un minimum de l'indice géomagnétique, qui peut être décalé d'un an par rapport à celui des taches. Le maximum le plus important de l'activité géomagnétique, pour trois des quatre cycles présentés ici, se situe durant la phase de décroissance de l'activité solaire. Il met en jeu à la fois l'activité éruptive et le passage, sur le disque solaire, des trous coronaux. En fin de cycle, lorsque l'activité solaire a fortement décrû, apparaît un ultime maximum de l'activité géomagnétique (indiqué sur la figure par un astérisque) qui, lui, n'est lié qu'à la présence de trous coronaux. L'importance de ce dernier maximum permet de prévoir l'amplitude du maximum de l'indice des taches du cycle suivant. Sans entrer dans une discussion technique, on le constate sur la figure 6-10, puisqu'au plus bas de ces maxima de fin de cycle, celui du cycle 19, correspond le cycle de taches le plus faible (le cycle 20) et que les deux suivants (fin de cycles 20 et 21), sensiblement de même amplitude, correspondent à deux cycles de taches de même importance (les cycles 21 et 22). Le dernier maximum lié aux orages récurrents, observé en 1994, laisse prévoir un cycle 23 de même amplitude (RI_{12} de l'ordre de 160) que les deux cycles qui le précèdent. Comme cet ultime sursaut de l'activité géomagnétique commence trois à quatre ans avant le début officiel du cycle suivant, son lien étroit avec lui montre que ce dernier est déjà en cours.

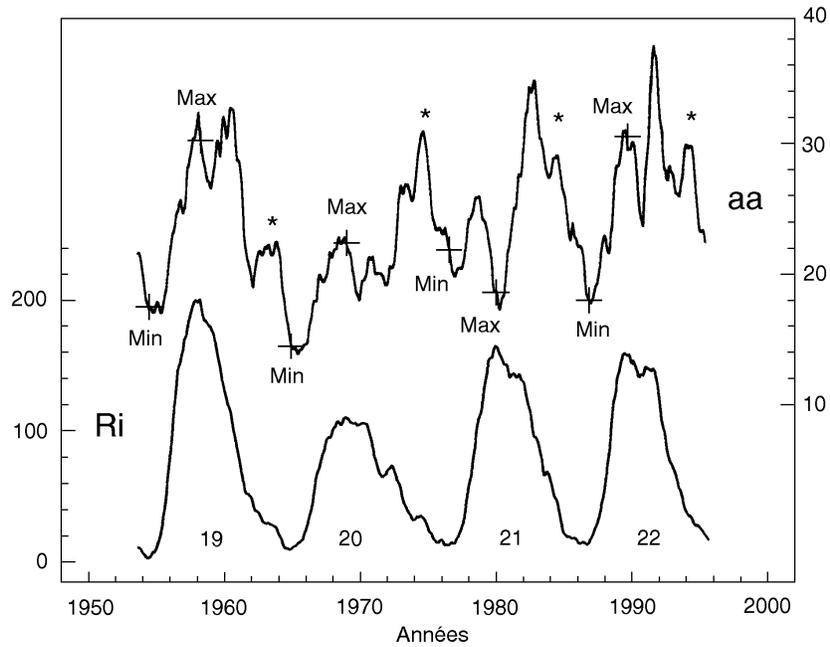


Figure 6-10 : Comparaison du cycle des taches RI_{12} (en bas) et de l'indice géomagnétique Aa moyenné de la même manière. Les maxima et les minima des taches sont reportés sur la courbe du haut.

6.6 Le cycle étendu

Les diagrammes papillon des taches (figures 6-6 et 6-7) montrent qu'elles apparaissent en début de leur cycle à des latitudes de l'ordre de 40° . Pour obtenir des informations à plus hautes latitudes, on doit observer d'autres traceurs. Les régions actives éphémères et les facules, de même que les filaments $H\alpha$ permettent cette étude. Les régions actives éphémères et les facules identifiées, par leur polarité magnétique, au nouveau cycle, apparaissent à des latitudes comprises entre 35° et 65° , trois à quatre ans avant le début du cycle des taches. Elles migrent ensuite vers les latitudes plus basses de telle sorte qu'au début du cycle des taches, ces régions se situent aux mêmes latitudes qu'elles, vers 30° ou 40° , formant ainsi une branche qui précède celle des taches. Lorsque l'on dénombre les facules dans les régions polaires, on trouve, comme l'indique la figure 6-11, que leur cycle (a), de onze ans également, varie en opposition de phase avec le cycle des taches (b), leur nombre croissant au moment de la décroissance du cycle des taches précédent et atteignant son maximum au moment du minimum de celui-ci. Il en est de même des *plumes polaires*, régions coronales fines et denses observées à haute latitude, dont le nombre moyen (c) est également tracé sur la figure 6-11.

Si l'on mesure, au cours du cycle solaire la latitude moyenne des filaments H α quiescents, on observe une branche partant, comme celle des régions actives éphémères, de latitudes de l'ordre de 50°, et montant vers les pôles, les latitudes de 80° étant atteintes au moment du maximum des taches. Finalement, la figure 6-12 donne le diagramme de la latitude des émissions en couronne verte en fonction de la phase du cycle des taches. Ces émissions sont dues à des systèmes de boucles de champ magnétique coronal, dont la présence nécessite à la fois une ligne neutre, comme pour les filaments H α et un champ magnétique plus intense que celui du Soleil calme, comme c'est le cas pour les facules. Le diagramme a été obtenu par superposition des données de plusieurs cycles. Pour mieux évaluer le résultat, les données des deux hémisphères ont été traitées séparément et tracées dans les deux cadres de la figure 6-12. L'origine des abscisses correspond au minimum du cycle des taches (indiqué par un « m » minuscule) entre les deux cadres. Les maxima sont indiqués par des « M » majuscules. On voit donc qu'au moment du maximum précédant le cycle de référence, six à sept ans avant son début, les émissions de la couronne verte apparaissent à environ 60° de latitude avec une branche descendant en latitude pour aller rejoindre au début du cycle des taches la branche correspondante. Les émissions coronales se situent ensuite, cela est bien établi depuis plusieurs décennies, directement au-dessus des facules et donc, à basse latitude, des taches. Il est de ce fait logique que cette branche se poursuive de 40° en début de cycle vers 10° en fin de cycle. La branche partant vers les hautes latitudes est également bien visible sur ce diagramme. Elle se sépare de la première, quelques années avant le début du cycle des taches, et disparaît au moment du maximum.

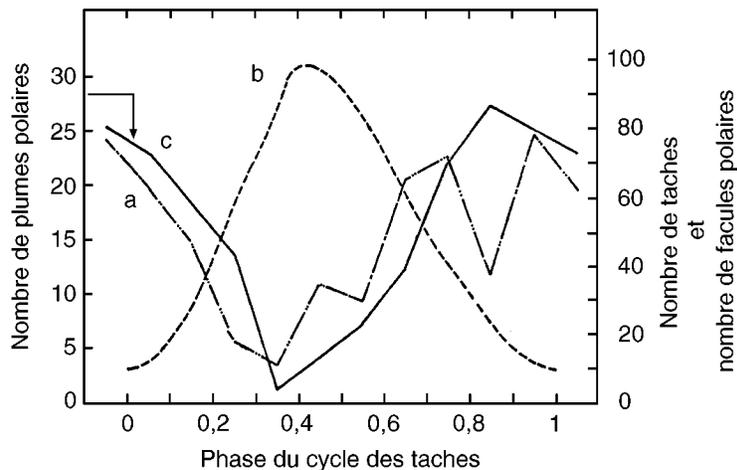


Figure 6-11 : Comparaison du nombre des facules polaires (a) et du cycle des taches (b). La courbe (c) correspond au nombre de plumes polaires.

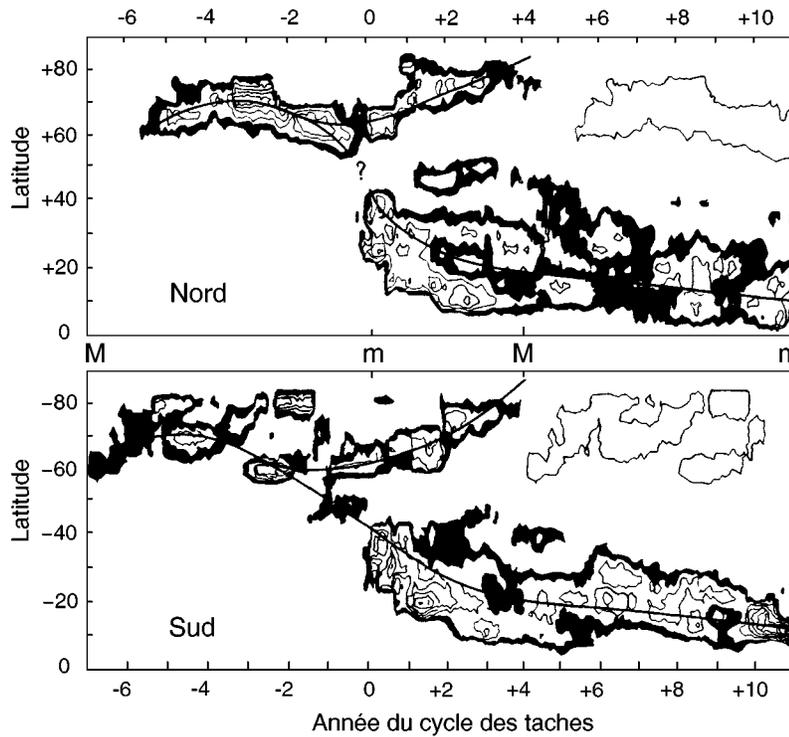


Figure 6-12 : Latitude des émissions coronales dans la raie verte ($\lambda = 530$ nanomètres), en fonction de l'année du cycle des taches (origine au minimum). Pour comparaison, les deux hémisphères ont été traités séparément.

Le diagramme de la figure 6-12 résume ainsi l'ensemble du cycle étendu, dont le cycle des taches n'est que la phase terminale. La figure est périodique et le cycle suivant a été indiqué par la répétition des contours, sur la droite du diagramme. Les polarités, que ce soient celles des champs à grande échelle, des facules ou des taches seront inversées au cours de ce nouveau cycle. Le cycle étendu dure donc au moins 18 ans puisqu'il commence durant la phase de décroissance du cycle de taches précédent qui représente environ 7 ans. Néanmoins il est tentant de penser (sans que cela soit démontré) qu'il dure en fait 22 ans puisque, comme nous l'avons mentionné à la section 6.3, on continue à observer quelques taches d'un cycle jusqu'au maximum du suivant.

6.7 L'origine du cycle solaire

6.7.1 Le modèle de Babcock

Le modèle de cycle solaire proposé par H. Babcock au début des années soixante, est à l'origine de nombreux développements de modélisation du cycle des taches, à partir d'une dynamo solaire oscillant avec un cycle de 22 ans. Partons, en période de minimum du cycle, d'un champ de type dipolaire, dont l'hémisphère Nord est de polarité sud, comme la figure 6-13 l'indique dans sa partie (a). Sous l'effet de la rotation différentielle, cette géométrie initiale du champ magnétique se transforme, les lignes du champ magnétique interne s'étirant comme le montre la partie (b) de la figure. Quand des boucles de ce champ devenu parallèle à l'équateur, émergent à la surface du Soleil, ainsi que l'illustre la partie (c) de la

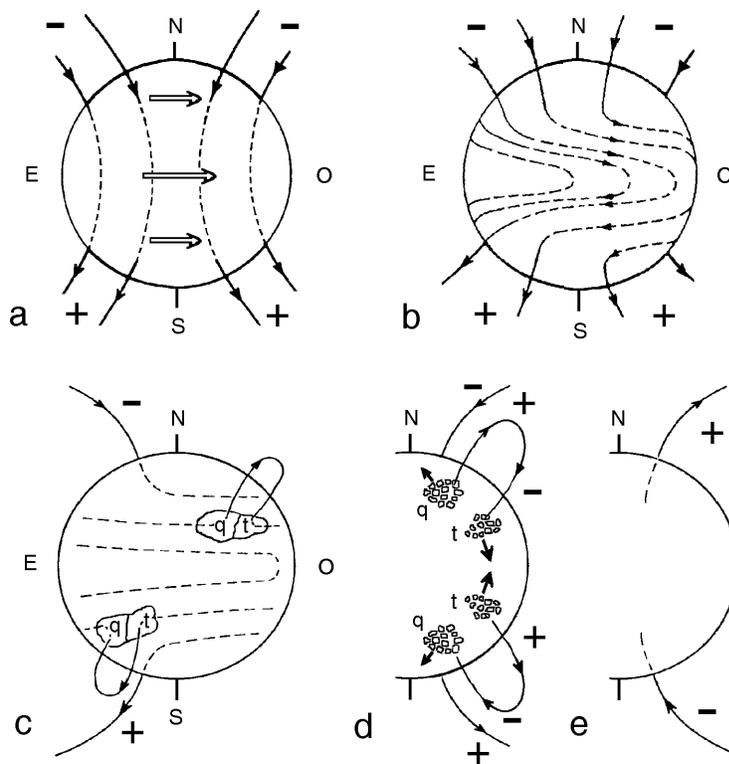


Figure 6-13 : Modèle du cycle solaire de Babcock.

figure, des taches photosphériques apparaissent. Remarquons que dans l'hémisphère Nord, leur polarité, d'une manière naturelle, est sud (signe -) pour la tache de tête (t) et nord (signe +) pour la tache de queue (q). La partie (d) de la figure représente la dispersion des régions actives, sous l'effet des mouvements propres et de la rotation différentielle. Les taches de tête de l'hémisphère Nord et Sud se rapprochent et leurs champs, de direction opposée, tendent à s'annihiler. Pendant ce temps, celui des taches de queue migre vers les pôles, annihile le champ polaire existant qui est de sens inverse au sien et finalement, en fin de cycle, installe un champ de polarité nord dans l'hémisphère Nord (e). Ainsi, dans ce modèle, se retrouve-t-on, au début du cycle de taches suivant, avec une polarité inversée par rapport à la situation de départ (a). Les modèles de ce type permettent de simuler

numériquement de nombreuses caractéristiques du cycle des taches, y compris le diagramme papillon des taches. Pourtant, dans le modèle de Babcock, la restauration du champ polaire, inversé, n'a lieu qu'à la fin du cycle des taches, ce qui n'est pas compatible avec la description, faite dans la section 6.6, du cycle étendu.

6.7.2 Les modèles de transport du flux magnétique

Un autre type de modèle a donc été essayé pour tenter, de plus, de simuler l'évolution du champ à grande échelle. Les modèles numériques de transport du flux magnétique à la surface du Soleil prennent en compte, outre la rotation différentielle, la diffusion, par une marche au hasard, sous l'effet du champ de vitesse des supergranules, du champ des régions actives en fin de vie. Les modèles les plus récents incluent aussi un écoulement méridien vers les pôles. La figure 6-13 illustre les résultats d'un modèle simulant bien les caractéristiques du cycle étendu. La figure représente une carte synoptique sur 22 ans. Les abscisses correspondent au temps et les ordonnées aux latitudes. Les phases des cycles sont indiquées en haut de la figure. La polarité du champ magnétique est indiquée en blanc pour les polarités nord, et en noir pour les polarités sud. Des régions intermédiaires existent, où aucune polarité n'est dominante. Les dates ont été fixées ici par comparaison aux observations de champ magnétique.

Prenons d'abord le cycle des taches numéro 21 qui commence en 1976 et se termine en 1986. Une branche du schéma part de 40 degrés environ et décroît en latitude jusqu'à disparaître au-delà de 1984 près de l'équateur. Cette branche coïncide donc avec le diagramme papillon des taches. Durant la seconde partie du cycle précédent (cycle 20), les taches suivaient le même type de branche, mais, dans l'hémisphère Nord, avec la polarité indiquée en noir. Pendant ce temps les polarités nord, indiquées en blanc, étaient apparues à environ 60 degrés de latitude, peu de temps avant le maximum du cycle 20 et avaient migré vers les hautes latitudes d'abord, puis au moment du minimum de 1976, couvert la plus grande part de l'hémisphère Nord. En 1989, maximum du cycle 22, les polarités nord réapparaissent dans l'hémisphère Nord, à 60 degrés de latitude. Une comparaison

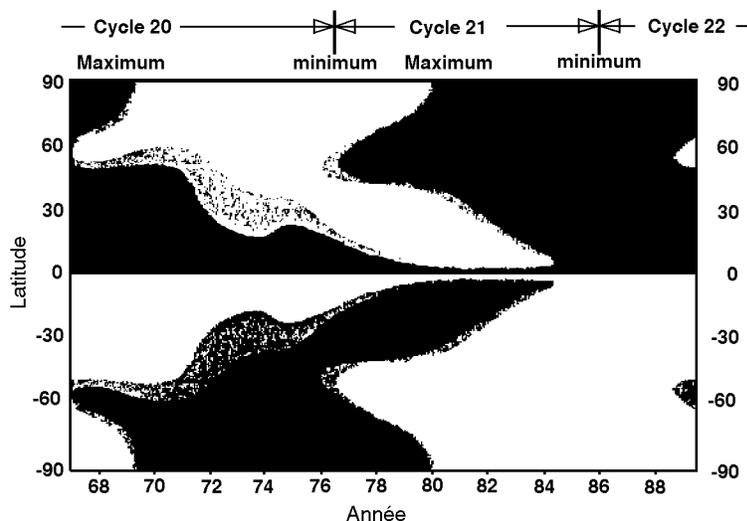


Figure 6-14 : Simulation du cycle du champ magnétique photosphérique par un modèle de transport du flux magnétique. La polarité magnétique nord est en blanc, la polarité sud en noir.

de ces résultats avec la figure 6-12, de la section précédente, confirme la qualité de cette simulation.

Néanmoins on peut reprocher à ce type de modèle de se limiter à la surface du Soleil, sans décrire les phénomènes internes. Les informations sur l'intérieur du Soleil, obtenues par l'héliosismologie, devraient permettre, à échéance, de faciliter la convergence des modèles vers une explication globale du cycle.

6.8 Le cycle solaire et la modulation des rayons cosmiques

L'arrivée d'une particule primaire du rayonnement cosmique déclenche, par interaction avec les atomes de l'atmosphère terrestre, une cascade de particules secondaires. Les moniteurs à neutrons permettent la détection de la composante nucléonique, formée des neutrons et protons secondaires. Ces particules créent, dans la gaine de plomb de l'instrument, des neutrons de basse énergie. Dans des tubes contenant du trifluorure de bore (BF_3), la désintégration du bore, sous l'effet des neutrons lents, éjecte des noyaux d'hélium ionisants qui peuvent être comptés. Les variations d'intensité des rayons cosmiques sont systématiquement surveillées par un réseau mondial de moniteurs (voir encadré 6-II).

La figure 6-15 met bien en évidence la modulation de l'intensité des rayons cosmiques atteignant la Terre au cours du cycle de 11 ans. Comme nous l'avons déjà mentionné au chapitre précédent, pendant le maximum du cycle les inhomogénéités du champ magnétique interplanétaire (complexité de la lame neutre, présence de régions d'interaction et d'ondes de choc interplanétaires) perturbent la propagation des rayons cosmiques. Les décroissances Forbush, dont nous reparlerons plus précisément au chapitre suivant, sont responsables d'une part importante de la diminution des rayons cosmiques durant le maximum d'activité où l'intensité des rayons cosmiques est minimale. A l'opposé, durant le minimum de l'activité solaire un plus grand nombre de rayons cosmiques atteignent la Terre. On notera enfin sur cette figure que les maxima de rayons cosmiques ont un profil qui

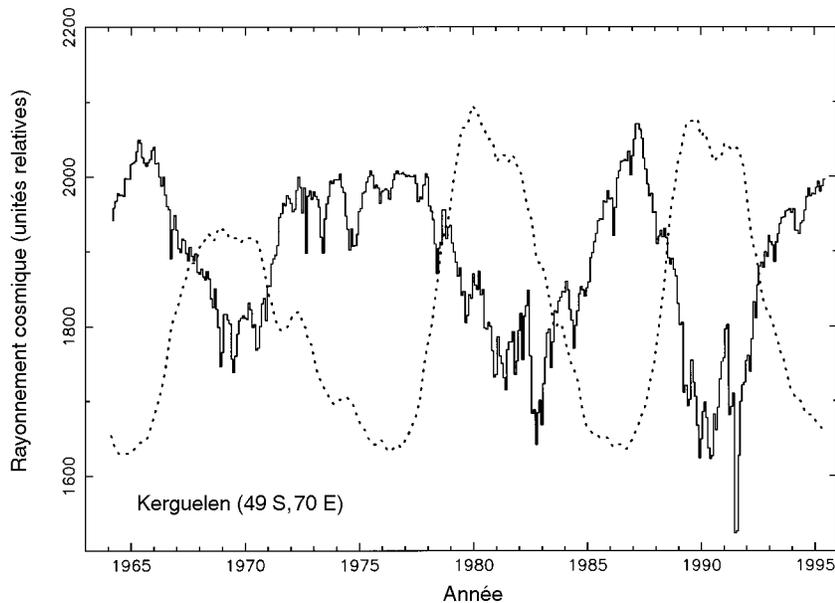


Figure 6-15 : Mesure de la composante nucléonique du rayonnement cosmique au cours de trois cycles solaires (moniteur à neutrons de Port-aux-Français, Iles Kerguelen). L'indice des taches est indiqué en pointillés.

diffère suivant la parité des cycles. Ils durent plus longtemps, formant une sorte de plateau, lorsque le champ magnétique solaire a une polarité nord dans l'hémisphère Nord. Cet effet est attribué au sens de circulation des rayons cosmiques dans l'héliosphère, qui s'inverse d'un minimum à l'autre, comme nous l'avons mentionné à propos de la figure 5-22 du chapitre précédent.

6.9 Les radio-isotopes cosmogéniques

Outre son intérêt pour la compréhension des phénomènes de l'héliosphère, l'étude des rayons cosmiques est fondamentale pour l'interprétation de l'abondance des radioéléments cosmogéniques que chacun connaît par les datations au carbone 14. Les radio-isotopes, produits par les collisions des rayons cosmiques et des neutrons secondaires avec les atomes de l'atmosphère, se comptent par dizaines. Les atomes peuvent soit capturer des neutrons, soit être scindés (réactions de spallation) et se transformer en éléments radioactifs. Les deux radio-isotopes les plus étudiés sont le carbone 14 (^{14}C) et le béryllium 10 (^{10}Be). Avec l'aluminium 26, le chlore 36, le krypton 81 et le calcium 41, ils sont ceux dont la durée de vie est la plus longue. La moitié des atomes de béryllium 10 se désintègrent en 1,5 million d'années et, pour le carbone 14, en 5730 ans. Mais contrairement à l'aluminium, au chlore, au krypton et au calcium, plus difficiles à mesurer, leur taux de production est relativement important : 2,5 atomes par centimètre carré et par seconde pour le carbone 14 et 0,035 atome par centimètre carré et par seconde pour le béryllium 10.

L'éclatement de noyaux d'oxygène et d'azote atmosphériques sous l'impact d'une particule issue du rayonnement cosmique est à l'origine de la création de béryllium 10. Une fois formés, les atomes de béryllium 10 s'attachent aux aérosols et sont transportés par la circulation atmosphérique. On estime à un an et demi environ la durée de leur transport avant qu'ils ne se déposent, à la suite de chutes de pluie ou de neige, dans les calottes polaires ou dans des sédiments marins et lacustres, d'où ils peuvent être extraits pour être mesurés. Le carbone 14, issu de la capture d'un neutron (avec émission d'un proton) par un atome d'azote 14, parcourt un trajet beaucoup plus long que le béryllium avant de se fixer. Inclus

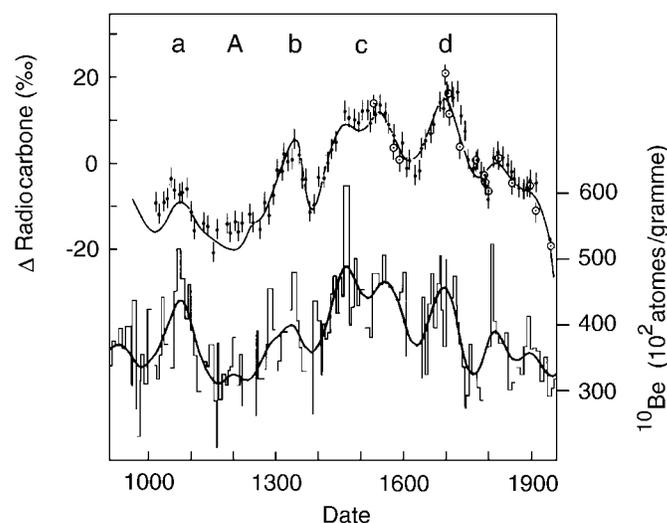


Figure 6-16 : Comparaison sur mille ans des mesures du carbone 14 et de celles du béryllium 10.

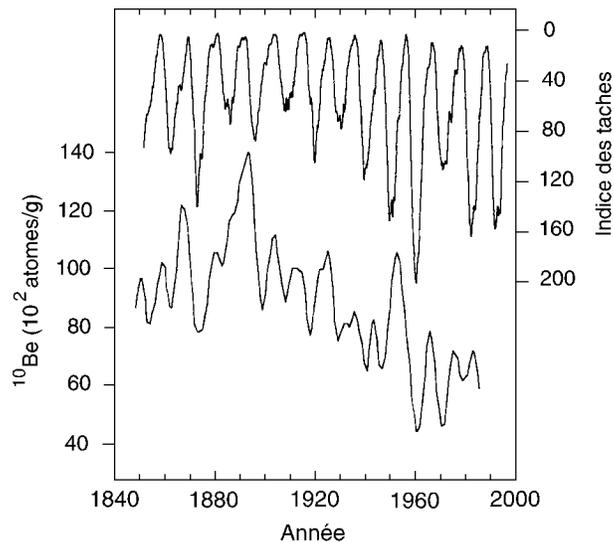


Figure 6-17 : Détection des cycles d'activité solaire dans les mesures du béryllium 10.

dans une molécule de gaz carbonique, il reste une centaine d'années dans l'atmosphère puis participe au cycle du carbone. Les êtres vivants le fixent. Son renouvellement s'interrompt à leur mort, que le carbone 14, par la mesure de son taux de désintégration, permet de dater. On retrouve ainsi le carbone 14 dans le bois, les ossements, les coquilles de fossiles ou les coraux, par exemple.

L'un des problèmes cruciaux de l'utilisation de ces méthodes est de définir une échelle temporelle absolue. Pour le carbone 14, le comptage des anneaux des arbres fournit une datation absolue sur les 8 500 dernières années. Dans les carottes de glace, les variations saisonnières des précipitations sont détectées par la fluctuation des teneurs isotopiques. De plus, la mesure des isotopes liés aux explosions nucléaires dans l'atmosphère et à l'acidité due aux éruptions volcaniques permettent, pour les périodes les plus récentes, de dater les différentes profondeurs. La présence d'événements plus anciens fournit une datation relative des échelles de temps des différents sites où les carottes ont été prélevées.

La figure 6-16 montre une comparaison, pour le dernier millénaire, de résultats obtenus indépendamment pour le carbone 14 dans les anneaux d'arbres et, dans la partie basse de la figure, pour le béryllium 10 dans une carotte de glace prélevée au Pôle Sud. La variation des courbes, en excellent accord entre les deux techniques, est attribuée principalement à celle de la production des isotopes dus aux rayons cosmiques, par la modulation de l'activité solaire. Les minima relatifs de l'activité solaire se traduisent par des maxima de production des radioéléments indiqués par a, b, c et d sur la figure. Certains ont reçu les noms de scientifiques ayant étudié l'activité solaire : de Wolf (b), de Spörer (c) et de Maunder (d). Le maximum de Maunder, dont nous avons déjà parlé à la section 6.1, se trouve coïncider avec une période de climat froid nommée par les historiens « Petit Âge Glaciaire ». De même, la période relativement chaude du « Petit Optimum Médiéval » correspond à une période d'activité solaire relativement forte (notée A sur la figure) aux XI^e et XII^e siècles. Cette simultanéité pose le problème d'un lien possible entre activité solaire et climat. Nous verrons dans la section suivante que les études d'isotopes dans les carottes de glace apportent un premier élément de réponse à cette question.

Le carbone 14, nous l'avons vu, reste dans l'atmosphère une centaine d'année. Ce temps est long pour que des périodes de l'ordre de celle du cycle solaire puissent être mesurées précisément. Par contre le béryllium, avec un séjour d'un an

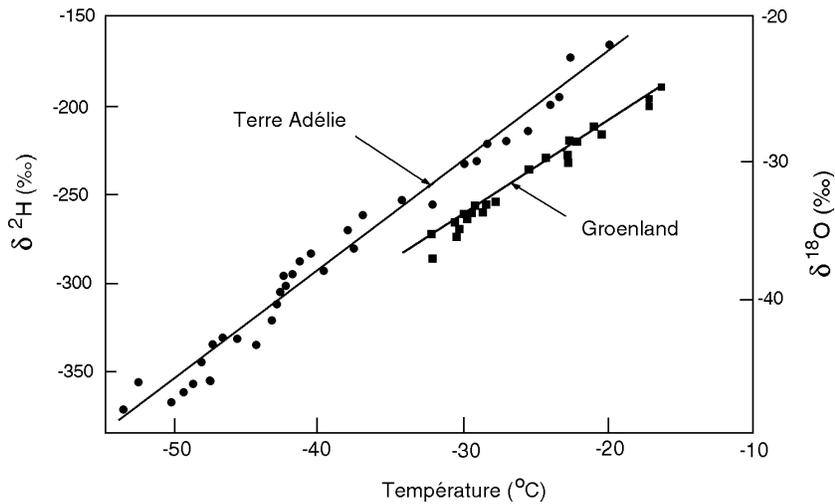


Figure 6-18 : Thermomètre isotopique dans des carottes de glace de Terre-Adélie et du Groenland.

seulement dans l'atmosphère, se prête mieux à de telles études. La figure 6-17 compare, pour les 150 ans passés, le cycle des taches (en haut), que l'on a tracé inversé et la concentration de béryllium, dans une carotte de glace prélevée au Groenland. Un examen attentif de la figure montre qu'à quelques exceptions près, on retrouve, dans le tracé du béryllium, la signature des cycles solaires. Il est à noter que pour faciliter la comparaison, un décalage de deux ans a été introduit entre les deux courbes. Cela correspond à un retard de six mois environ de la modulation des rayons cosmiques sur l'activité solaire auquel s'ajoute la durée du séjour du béryllium dans l'atmosphère, avant qu'il ne se dépose.

Le carbone 14 permet de remonter à 45 000 ans (huit fois sa période de désintégration), les mesures dans les anneaux des arbres, avec leur bonne chronologie, étant, nous l'avons vu, plus limitées. A l'heure actuelle, les carottes de glaces permettent, pour le béryllium, d'analyser 150 000 ans environ. Avec le même élément, les sédiments marins permettent d'atteindre le million d'années, mais la résolution temporelle est moins bonne en raison de mélanges. La difficulté d'interprétation des données augmente avec l'âge de l'échantillon car, sur de grandes échelles de temps, on doit tenir compte des variations climatiques importantes qui modifient profondément le régime des précipitations. Ce fut le cas par exemple durant le dernier épisode glaciaire (celui durant lequel vécurent les hommes de Lascaux), dont la fin se situe au Paléolithique supérieur, il y a 10 000-12 000 ans. Qu'il s'agisse de carottes de glace ou d'autres supports, le climat intervient aussi de manière plus complexe : c'est le cas par exemple en ce qui concerne les variations des échanges entre l'atmosphère et l'océan pour le carbone 14. On doit enfin prendre en compte, dans l'interprétation de l'abondance des radio-isotopes cosmogéniques, les variations du paléomagnétisme. Nous avons vu en effet, à la section 5.2.2, que le champ magnétique terrestre variait, indépendamment de l'activité géomagnétique, à long terme. Une décroissance du dipôle magnétique de la Terre favorise l'accès des rayons cosmiques jusqu'à l'atmosphère et augmente donc la production de radioéléments cosmogéniques.

Il est très vraisemblable qu'un jour il sera possible, malgré ces difficultés, de reconstituer l'activité solaire des cycles passés sur de longues périodes à l'aide du béryllium et d'autres éléments, grâce au progrès des mesures et grâce aux nouvelles carottes de glace qui seront étudiées. C'est probablement de là que viendront une partie des progrès permettant de comprendre le cycle solaire,

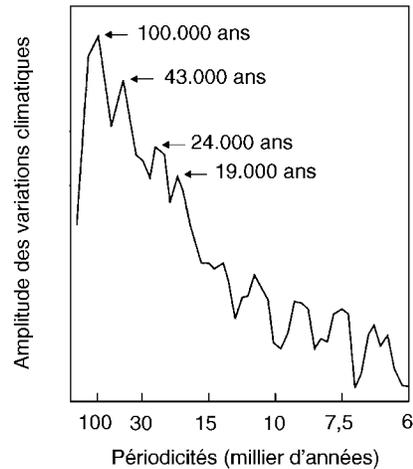


Figure 6-19 : Périodicités détectées dans le climat passé par mesure de ^{18}O dans les sédiments marins.

puisque les données actuelles sur l'activité solaire, trop récentes (même si elles remontent à quelques siècles), limitent considérablement la compréhension des variations à long terme et de la nature du cycle solaire, comme nous l'avons vu fréquemment tout au long de ce chapitre.

6.10 Le Soleil et le climat

6.10.1 La théorie astronomique du climat

Les archives dont nous disposons aujourd'hui sont très diverses et rendent possible l'étude de l'évolution temporelle de nombreux paramètres. Les radio-isotopes permettent la datation et lorsqu'ils sont formés par l'impact des rayons cosmiques, l'étude de l'activité solaire. D'autres isotopes, stables ceux-là, apportent des éléments précis sur le climat car leur abondance relative dépend de la température. C'est le cas de l'oxygène 18 (comparé à l'oxygène 16) et du deutérium, l'hydrogène 2, (comparé à l'hydrogène 1), tous deux présents dans l'eau dans de très faibles proportions. Lorsque la température diminue, un effet sélectif de la condensation lors des précipitations conduit à une abondance plus faible de l'isotope lourd (^{18}O ou ^2H) dans les glaces polaires. Inversement, les coquilles calcaires des fossiles présents dans les sédiments marins sont plus riches en isotopes lourds, comme l'eau des océans, lorsque le climat est plus froid : les calottes polaires sont alors plus étendues et mobilisent plus de molécules d'eau à faible teneur en isotopes lourds. La figure 6-18 montre, par exemple, en ce qui concerne les glaces polaires, que l'on dispose, grâce aux deux rapports isotopiques mentionnés plus haut, d'un thermomètre dont l'étalonnage se fait par comparaison aux mesures récentes de température. Basée sur l'étude de l'oxygène dans les carottes de sédiments marins, la figure 6-19 donne une analyse des fréquences rencontrées dans une courbe de température couvrant un demi-million d'années. On voit ressortir nettement des périodes à 100 000 ans, 43 000 ans, 24 000 et 19 000 ans. dans l'amplitude des variations climatiques.

L'hypothèse d'un lien possible entre les paramètres de l'orbite terrestre et les glaciations a été avancée dès le milieu du XIX^e siècle (par Adhémar en 1842). La *théorie astronomique des climats*, connue aussi sous le nom de *théorie de*

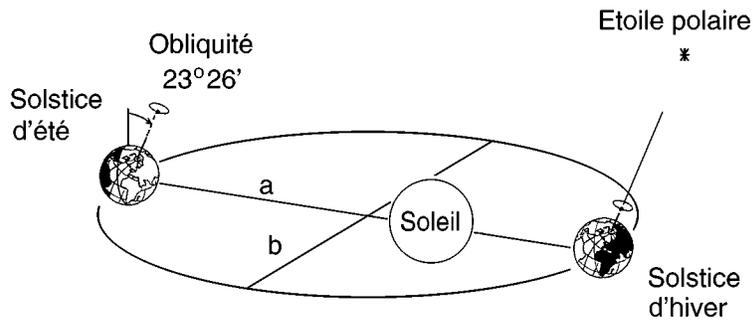


Figure 6-20 : Paramètres de l'orbite et de la rotation terrestre pris en compte dans la théorie astronomique des climats.

Milankovitch, semble aujourd'hui universellement admise, car elle explique bien l'âge des glaciations les plus récentes. L'orbite actuelle de la Terre est représentée sur la figure 6-20. On sait qu'elle est elliptique et que le Soleil occupe l'un des foyers de l'ellipse. On sait aussi que l'axe de rotation de la Terre est incliné de $23^{\circ}26'$ par rapport à la normale au plan de l'écliptique, cet angle, appelé *obliquité de l'écliptique*, étant à l'origine des saisons. La différence entre le demi-grand axe de l'ellipse (a) et le demi-petit axe (b) est fortement exagérée sur la figure. Dans la réalité la différence entre les deux axes ne représente que 6% de la valeur du grand axe, cette valeur étant l'*excentricité* de l'ellipse. Enfin, la figure rappelle qu'actuellement la Terre est plus proche du Soleil durant l'hiver boréal que durant l'été.

Cette situation est très lentement variable, la Lune et les planètes perturbant le mouvement de la Terre. L'excentricité de l'orbite terrestre varie de zéro à 6% avec des périodes de 400 000 et 100 000 ans. Avec une période de 41 000 ans, l'angle de rotation de la Terre, l'obliquité, varie de 22° à 25° environ. On retrouve donc sensiblement les périodes les plus longues de la figure 6-19.

L'orbite de la Terre subit aussi, sous l'action des autres planètes, un mouvement de rotation dans le plan de l'écliptique. De plus, le renflement équatorial de la Terre crée un mouvement semblable à celui de l'axe d'une toupie qui décrit un cône, mouvement de *précession*. L'axe de rotation de la Terre parcourt ce cône en 26 000 ans. Ainsi, alors qu'il pointe actuellement sur l'étoile polaire dans l'hémisphère Nord, l'axe de rotation était dirigé vers la constellation du Dragon il y a 5 000 ans ; il pointera vers Céphée dans 5 000 ans. Sous ces deux effets, la Terre qui, actuellement est au plus près du Soleil (au *périhélie*) durant l'hiver boréal se trouve à l'inverse au plus loin du Soleil (à l'*aphélie*), 11 000 ans plus tôt ou plus tard, durant la même période de l'année. Dans le premier cas, cela rend moins froids les hivers de l'hémisphère Nord, les rendant plus froids dans le second. On trouve, en tenant compte de l'évolution de l'excentricité de l'orbite, que ces phénomènes créent sur l'insolation des périodes de 23 000 et 19 000 ans, proches de celles visibles sur les données de la figure 6-19.

L'étape suivante consiste à simuler, avec les périodes astronomiques et au prix d'un ajustement de paramètres, les données de température déduites de l'analyse des isotopes dans les sédiments marins. La figure 6-21 montre que la courbe simulée suit bien les variations observées représentées par les points. Dans le cadre de cette théorie, la courbe permet, de plus, de prévoir l'évolution du climat. On voit, sur la partie droite de la figure, que la période actuelle correspond à un maximum de la température et que l'on devrait s'attendre, dans les 60 000 ans prochaines années à l'installation progressive, avec quelques retours à des températures plus élevées, d'une période glaciaire semblable à celle d'où nous

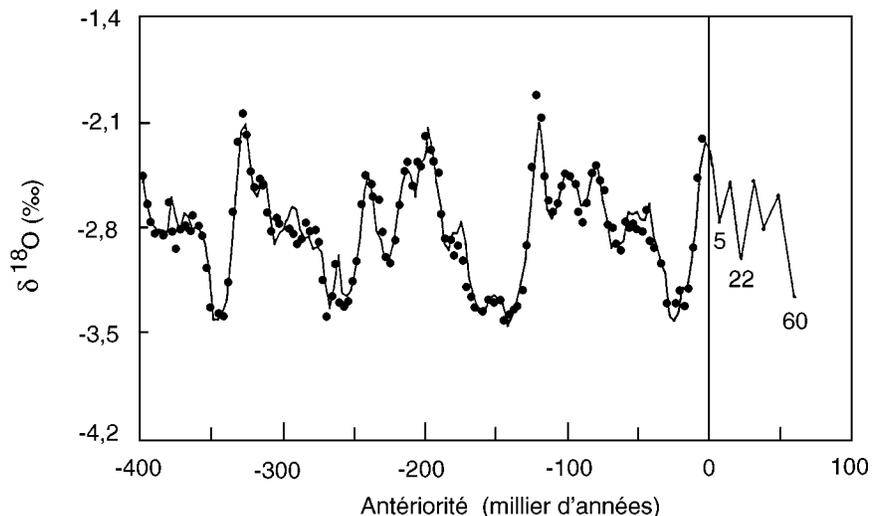


Figure 6-21 : Ajustement aux points déduits des mesures de ^{18}O , d'une fonction tenant compte des périodes astronomiques. Prédiction du climat futur par le prolongement de la courbe. Les chiffres, sur la figure, sont donnés en milliers d'années.

sortions il y a 10 000 ans. Ceci ne tient pas compte, évidemment, des modifications du climat induites par l'homme, dont l'augmentation artificielle de l'effet de serre ou l'hiver nucléaire sont les exemples les plus fréquemment évoqués. Une grande incertitude subsiste donc sur le climat futur puisque l'évolution des effets liés aux activités humaines reste imprévisible.

6.10.2 Existe-t-il une relation entre l'activité solaire et le climat ?

Nous avons mentionné, lors de la description de la figure 6-17, qu'une période de faible activité solaire, le Minimum de Maunder coïncidait avec une période froide, le Petit Âge Glaciaire à la fin du XVII^e siècle tandis qu'au XII^e siècle, une période de faible production des isotopes cosmogéniques, que l'on interprète comme une forte activité solaire, coïncidait avec le Petit Optimum Médiéval. Mais deux hirondelles font-elles le printemps ?

La comparaison de la concentration relative du deutérium (sensible à la température) et de l'abondance du béryllium (indicateur de l'activité solaire) dans

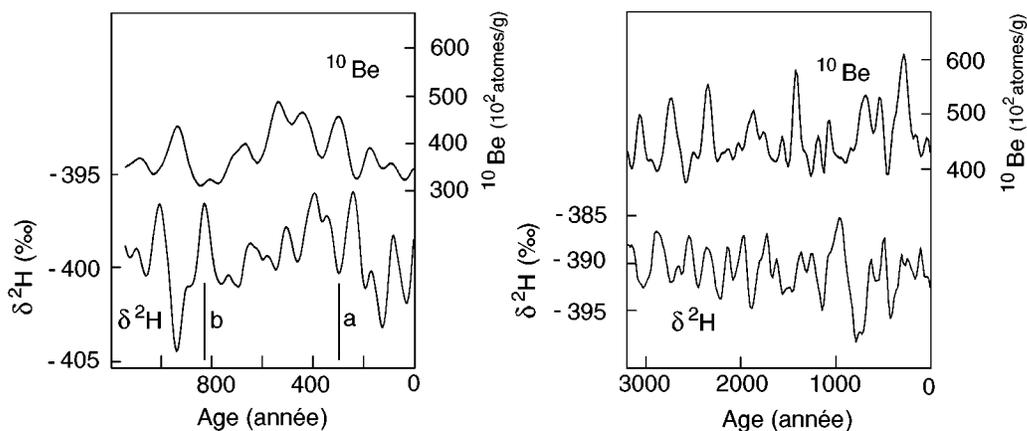


Figure 6-22 : Comparaison des mesures du béryllium 10 (activité solaire) et du deutérium (température) dans les mêmes carottes de glace (Pôle Sud à gauche, sur 1200 ans ; Dôme C à droite, sur les 3000 dernières années).

les carottes de glace fournit un élément important à la discussion des effets envisagés de l'activité solaire sur le climat. La figure 6-22 permet cette comparaison. La partie gauche de la figure résulte de mesures dans une carotte de glace prélevée au Pôle Sud. Elle porte sur les 1 200 dernières années. La partie droite montre des courbes obtenues à partir d'une carotte de glace provenant de la station Dôme C, sur le plateau antarctique, portant, elle, sur plus de 3 000 ans. L'examen de la figure et, plus encore, l'analyse statistique des données montrent qu'il n'y a pas de corrélation significative entre climat et activité solaire. Un point essentiel est de constater que chaque couple de courbes provient de la même carotte de glace, ce qui met la comparaison à l'abri de toute erreur de datation. Sur la figure 6-22 de gauche, deux périodes ont été indiquées. La première, notée (a) correspond à l'époque du Petit Âge Glaciaire. Pour cette période on observe effectivement de basses températures (montrant qu'il s'agit d'un phénomène à l'échelle mondiale et non uniquement européen), en conjonction avec une période de forte production d'isotopes cosmogéniques (donc de faible activité solaire). La seconde, notée (b), située au XII^e siècle, présente une situation inverse, à l'époque du Petit Optimum Médiéval. Néanmoins l'ensemble des données, portant sur des milliers d'années, tend à prouver que ces deux conjonctions sont dues au hasard et non à un effet systématique de l'activité solaire sur le climat, à l'échelle de la planète. Compte tenu des incertitudes sur l'interprétation du béryllium, on ne doit pas, cependant, considérer la question comme définitivement close, d'autant que des effets régionaux de l'activité solaire sur le climat ne peuvent pas être écartés sur la seule base de ces résultats.

Encadré 6.I

Le chaos

Un système déterministe est un système qui, pour des conditions initiales strictement identiques, évoluera strictement de la même manière. Depuis le siècle dernier, on sait qu'un système déterministe et *non-linéaire* peut, dans certains cas, pour des conditions initiales très proches, conduire à des évolutions totalement différentes. Il est dit alors *chaotique*. Cette approche a trouvé des applications dans de très nombreux domaines de la physique. Le cas le plus proche de celui qui nous intéresse ici est la théorie de la dynamo terrestre pour laquelle le chaos expliquerait les retournements brusques du dipôle géomagnétique que nous avons mentionnés dans la section 5.2.2 : deux dynamos de Bullard (voir figure 2-12), couplées, peuvent reproduire ce phénomène.

Un exemple simple de système chaotique est constitué par un pendule dont la masse est un aimant. Deux aimants fixes sont placés au-dessous, symétriquement de part et d'autre, qui exerceront une force non-centrée lorsque le pendule sera lancé. De nombreuses trajectoires de ce pendule sont chaotiques comme celle représentée sur la figure 6.I-1. Même si le pendule est lancé quasiment du même point et avec une vitesse initiale presque identique, sa trajectoire, au bout d'un certain temps, diffère complètement.

En astronomie, dès que plus de deux corps interagissent gravitationnellement, des trajectoires chaotiques peuvent apparaître, avec des résonances qui expliquent la distribution des astéroïdes ou celle des corps formant les anneaux de planètes. On sait aussi que la trajectoire des planètes elles-mêmes, ainsi que leur obliquité (l'inclinaison de leur axe de rotation) peuvent être chaotiques. L'obliquité de Mars varie de 0 à 60° en quelques millions d'années, celle de la Terre n'étant stable que grâce à la présence de la Lune.

Beaucoup plus récent qu'en astronomie, l'apport de la théorie du chaos à la physique est également important. La météorologie, la géophysique, la physique des plasmas et l'astrophysique ont bénéficié d'approches nouvelles de leurs problèmes les plus complexes. Il en est de même de toutes les sciences, de la chimie aux sciences économiques en passant par la biologie et la démographie.

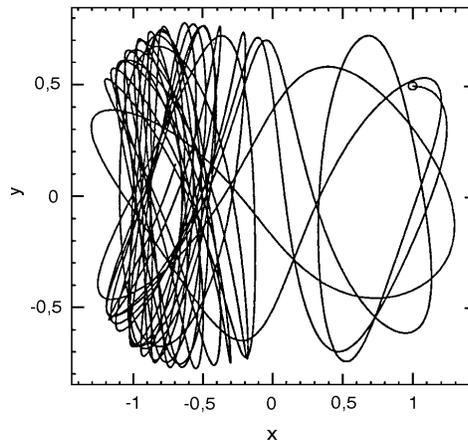


Figure 6.I-1 Trajectoire d'un pendule soumis à une force non-centrée.

Encadré 6.II

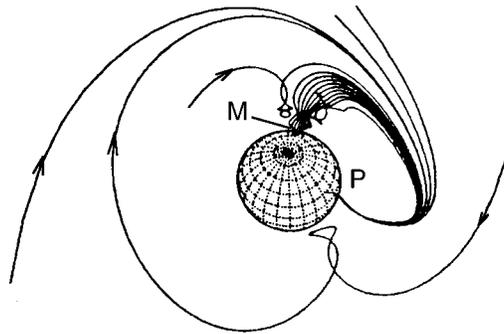
L'effet du champ magnétique terrestre sur les rayons cosmiques

Grâce à la répartition autour de l'ensemble du globe de moniteurs à neutrons, on peut calculer le spectre et étudier l'anisotropie des protons primaires car le champ magnétique de la Terre, suivant la position géographique de la station, filtre certaines énergies et certaines directions. La figure 6-II.1 montre des trajectoires aboutissant verticalement au point P. Certaines ne peuvent pas être empruntées par les rayons cosmiques car elles rencontreraient la surface du globe (au point M) avant d'atteindre le point P. Il résulte de la complexité des trajectoires que des stations très éloignées peuvent observer des rayons cosmiques arrivant de la même direction. C'est quasiment le cas pour des stations comme Kerguelen, dans l'océan Indien et des stations européennes comme celle de la Jungfrauoch en Suisse.

Outre l'énergie minimale de 450 MeV nécessaire pour que les rayons cosmiques puissent donner des particules secondaires traversant par cascades l'atmosphère, le champ magnétique terrestre définit, pour chaque localisation géographique, une énergie de coupure. Les régions polaires sont plus facilement accessibles aux particules que les régions équatoriales. La station de Dumont d'Urville, en Terre Adélie (Antarctique) a une coupure magnétique très basse (de l'ordre du MeV pour les protons). Celle de Kerguelen peut détecter des protons au delà de 500 MeV, tandis que celle de Huancayo au Pérou n'observait de protons qu'au delà de 5 GeV.

Les moniteurs à neutrons permettent une étude scientifique et une surveillance permanente du Soleil (protons de hautes énergies) et de l'héliosphère (effets Forbush, modulations quotidiennes, de 27 jours et de 11 ans). Indépendamment du filtrage par le champ géomagnétique, ils fournissent aussi une méthode de détection des neutrons émis lors les éruptions solaires.

Figure 6.II-1 Trajectoires de rayons cosmiques aboutissant au même point de la Terre.



Crédit et origine des figures

CHAPITRE 6 LE CYCLE SOLAIRE

- Figure 6- 1 P.L.
Figure 6- 2 d'après W.J. Wagner, 1988, *Adv. Space Res.*, 8, 7, 67
Figure 6- 3 P.L.
Figure 6- 4 d'après J. Kurths et al., 1993, in *Cosmic Dynamo*, Krause et al. (eds), p.83, Kluwer, Dordrecht
Figure 6- 5 *Solar Geophysical Data*, 1994, 599, 65
Figure 6- 6 B.D. Yallop et C.Y. Hohenkerk, 1980, *Solar Physics*, 68, 303
Figure 6- 7 H.W. Dodson et E.R. Hedeman, 1969, in Stickland (ed), *Annals of IQSY*, vol 4, MIT Press, Cambridge, U
Figure 6- 8 P. Lantos, P. Cugnon et A. Koeckelenbergh, 1993, *Proceed. Sol.Terr. Pred. Workshop.*, NOAA, Boulder
Figure 6- 9 d'après J.T. Hoeksema, 1984, PhD Thesis, Stanford University
Figure 6-10 P.L. d'après O. Richard et P. Lantos, en préparation
Figure 6-11 G. Newkirk, 1967, *Annual Review Astron. Astrophys.*, 5, 213
Figure 6-12 d'après J.L. Leroy et C. Noens, 1983, *Astron. Astrophys.*, 120, L1
Figure 6-13 d'après H.W. Babcock, 1961, *Astrophys. J.*, 133, 572, pour les parties a), b) et c)
Figure 6-14 d'après Y.M. Wang, N.R. Sheeley et A.G. Nash, 1991, *Astrophys. J.*, 338, 431
Figure 6-15 P.L. (données expérience Rayco, IF RTP, Brest)
Figure 6-16 d'après L.R. McHargue et P.E. Damon, 1991, *Reviews of Geophysics*, 29, 2, 141
et G. M. Raizbeck et al., 1990, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, A330, 463
Figure 6-17 J. Beer, G.M. Raisbeck et F. Yiou, 1991, in *The Sun in Time*, University of Arizona
Figure 6-18 R. Delmas, 1992, *Reviews of Geophysics*, 30, 1, 1
Figure 6-19 J. Imbrie et K.P. Imbrie, 1979, *Ice Ages, Solving the Mystery*, Enslow, Hillside, N.J.
Figure 6-20 P.L.
Figure 6-21 A. Berger, 1988, *Reviews of Geophysics*, 26, 4, 624
Figure 6-22 G.M. Raisbeck, F. Yiou, J. Jouzel, J.R. Petit, 1990, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, A330, 463
Figure 6.I-1 V. Croquette, 1996, présenté à l'Ecole Thématique du CNRS sur le Chaos dans l'activité solaire
Figure 6.II-1 D.F. Smart et M.A. Shea, 1994, *Adv.Space Res.*, 14, 787