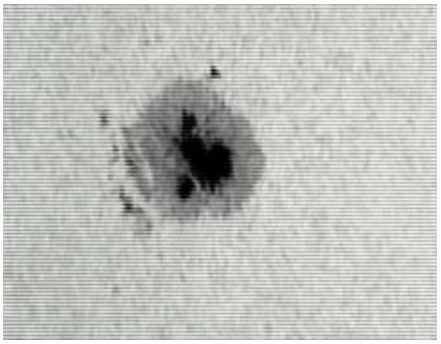
L'activité de surface du Soleil et son influence sur la Terre

D'après le site « Astronomie et mécanique céleste » de l'UFE de l'observatoire de Paris et *le site du LESIA*

A. L'activité du Soleil *(en détail sur le site de l'observatoire)*

Introduction

L'observation du Soleil, pendant quelques jours à quelques semaines, révèle que notre étoile ne présente pas toujours le même aspect : on constate la présence de **taches** qui se déplacent à la surface du Soleil. Des livres chinois datant de 800 avant notre ère mentionnent déjà leur existence. Ces taches correspondent à des zones de la **photosphère** (la couche superficielle du Soleil, voir la fiche « Soleil ») où la matière est plus froide, donc moins brillante (3000 à 4500 K, contre 5780 K pour le reste de la photosphère). Elle apparait sombre par contraste. (**Observation du Soleil : prudence !** suivez ce lien pour savoir comment faire.)



***Tache solaire** observée avec une lunette d'amateur. Elle fait la taille de la Terre ! On distingue une zone centrale plus sombre (donc plus froide), l'ombre, où les lignes de champ magnétiques sont perpendiculaires à la surface du Soleil, et une zone de pénombre périphérique. Crédit LESIA, Régis Le Cocguen.*

- WT 2009 : La température de l'ombre d'une tache solaire est plus froide de 1500 K que le reste de la photosphère (dont la température moyenne est de ~5800 K). Soit B1 le flux d'énergie émise par l'ombre et B2 le flux d'énergie émise par la zone autour de la tache (ces flux étant exprimés par unité de surface). Quel sera le rapport B2/B1 ? On rappelle la loi de Stefan Boltzmann pour l'énergie totale E rayonnée par un corps noir : $E = \sigma T^4$, où σ est la constante de Stefan-Boltzmann et T la température en Kelvins.

(A) 0,004 (B) 1,35 (C) 0,74 (D) 3,31 (E) 223

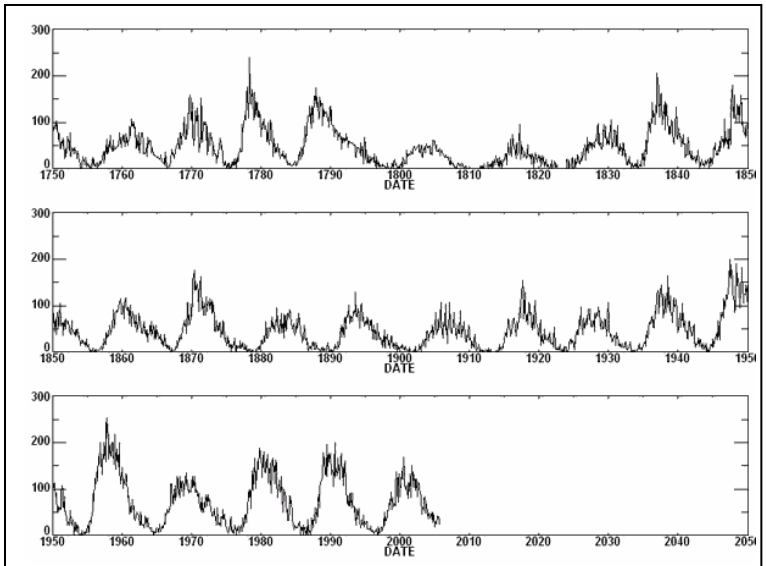
Des études plus systématiques, dès le XVIIe siècle, ont révélé que l'abondance de ces taches, reflet de l'activité de notre étoile, varie de façon marquée. Nous verrons que l'activité solaire a des conséquences importantes sur les systèmes terrestres et sur les activités humaines.

Le cycle solaire

Au XIXe siècle, on a montré que le nombre apparent de taches sur la surface du Soleil passait par un minimum tous les 11 ans. C'est le **cycle solaire.** La **période de 11 ans** est en fait une valeur moyenne. Depuis 1700, la période a varié entre 9 et 14 ans pour les valeurs extrêmes.

Au début du XXe siècle, on découvrit ensuite que les taches apparaissent d'abord aux hautes latitudes, puis de plus en plus près de l'équateur solaire à mesure que le cycle avance. Le mouvement des taches met également en évidence la rotation du Soleil sur lui-même, en 25 jours à l'équateur, en 30 jours près des pôles. (voir PT 2009 en annexe).

Au début du XXe siècle, on mit en évidence le caractère magnétique des taches solaires. Elles correspondent à des zones où le champ magnétique est plus intense. D'autres manifestations du champ magnétique solaire sont les éruptions solaires.



Nombre moyen de taches solaires du XVIIIe au XXIe siècle

Les éruptions solaires

Les éruptions solaires sont les événements les plus énergétiques du système solaire. L'énergie libérée par seconde lors d'une grande éruption solaire peut atteindre 10^{22} Joules, soit une fraction notable de la puissance solaire totale (l'énergie rayonnée en moyenne par le Soleil en une seconde étant égale à 4.10^{26} Joules) ! Une éruption s'accompagne d'une émission importante de rayonnement (dans toute la gamme électromagnétique) et de l'accélération de particules à des vitesses proches de celles de la lumière. Les phénomènes éruptifs se déroulent dans la **chromosphère** et dans la **couronne** (voir la fiche « Soleil »).

Le cycle solaire (paragraphe précédent) est aussi un indicateur de l'activité éruptive du Soleil. Le nombre d'éruptions solaires suit en effet la même courbe : au plus bas au moment du minimum du cycle, il augmente ensuite très fortement. **Le nombre d'éruptions solaires est maximal un peu après le maximum du cycle solaire**. Bien sûr, tout ceci n'est que statistique et ne concerne que le nombre d'éruptions.

Dans un type de phénomène éruptif, les éjections de masse coronales, des bulles de matière de la couronne sont éjectés dans l'espace et peuvent atteindre la Terre. Mais, même lorsqu'il est calme, le Soleil nous envoie de la matière !

Une éruption solaire !

Découvrez l'évolution sur quelques heures d'un « flare », associé à un groupe de taches solaires.

Le vent solaire *(en détail sur le site de l'observatoire)*

Le Soleil émet en permanence près d'un million de tonnes de matière par seconde dans le milieu interplanétaire. C'est ce que l'on appelle le **vent solaire**. Il s'agit d'un plasma, c'est-à-dire d'un gaz constitué principalement d'électrons et de protons (noyaux d'hydrogène) mais aussi d'autres noyaux comme le noyau d'hélium. Ces particules s'éloignent du Soleil dans toutes les directions, à des vitesses de plusieurs centaines de kilomètres par seconde. Une composante du vent solaire (la plus rapide) dépend du cycle solaire et de l'activité solaire et connait donc des sursauts.

Les particules du vent solaire sont progressivement ralenties par leurs rencontres avec les particules du milieu interstellaire, jusqu'à s'arrêter. Cette limite – l'héliopause - définit l'héliosphère, un volume immense en forme de bulle allongée qui s'étend à plus de 100 unités astronomiques de notre étoile

B. Influence de l'activité de surface du Soleil sur la Terre

(en détail sur le site de l'observatoire)

Introduction

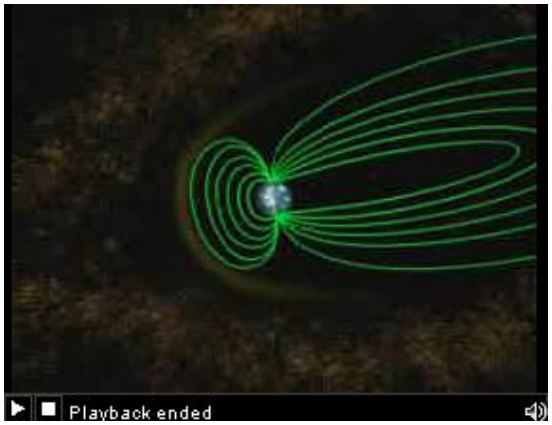
Les éruptions solaires provoquent des variations rapides et importantes des flux électromagnétiques et des flux de particules très énergétiques envoyées dans le milieu interplanétaire. Nous allons voir quelles peuvent être les conséquences sur Terre.

La Terre sous un flux de particules

Les particules (électrons, protons, ions) émises par le **vent solaire** ou lors des diverses éruptions solaires se propagent librement dans le milieu interplanétaire. Elles vont donc rencontrer des obstacles comme des **comètes**, des **astéroïdes** ou des **planètes**. Nous allons nous intéresser rapidement au cas de la Terre.

La Terre possède un **champ magnétique propre** (engendré par les mouvements du **noyau** liquide de fer, voir la fiche « Structure interne du Globe ») dont les pôles nord et sud sont proches des pôles géographiques. Cette enveloppe magnétique entourant notre planète s'appelle la **magnétosphère**. Elle permet de dévier les particules du vent solaire, car ces particules ne sont pas neutres, et se déplacent en spiralant le long des lignes de champ magnétique (*en savoir plus sur le mouvement des particules dans le champ planétaire*). La magnétosphère est donc comme une sorte de bouclier magnétique qui protège notre planète des particules très énergétiques et dévastatrices pour toute forme de vie.

Impact du vent solaire sur la magnétosphère terrestre
(crédit :NASA)



Film d'animation montrant l'impact du vent solaire sur la magnétosphère de la Terre (dont les lignes de champ magnétiques sont symbolisées en traits verts). Les particules du vent solaire (symbolisées en jaune) sont déviées par la présence du champ magnétique et la magnétosphère de la Terre est comprimée du côté jour.

Quizz
Vous installez une base sur la Lune, qui gravite à 300 000 km de la Terre. Serez-vous protégé des particules du vent solaire tout le temps ? parfois ? jamais ?

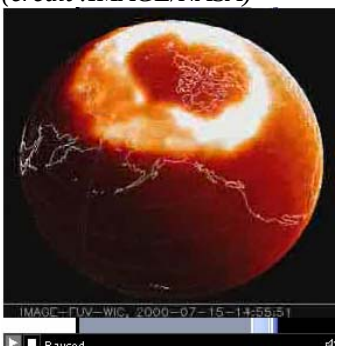
La magnétosphère subit aussi la pression du vent solaire : elle est comprimée du côté «jour» et allongée du côté «nuit». La limite extrême de la magnétosphère dans la direction du Soleil est située environ 60 000 km et s'étend sur des distances beaucoup plus importantes dans la direction anti-solaire.

Mais, selon l'orientation relative des lignes de champ magnétique terrestres et interplanétaires, des particules peuvent pénétrer le bouclier magnétique terrestre.

Les aurores polaires

Les **aurores polaires** (**boréales** dans l'hémisphère nord, **australes** dans l'hémisphère sud) sont une première manifestation de la précipitation des particules du vent solaire dans la haute atmosphère. Canalisées par les lignes de champ magnétiques dans les **cornets polaires** (les zones en entonnoirs formées par les lignes de champ magnétique près des pôles magnétiques), ces particules chargées entrent en collision avec les molécules de **l'ionosphère** (voir la fiche « Structure verticale de l'atmosphère »), dont elles excitent ou ionisent les atomes. En se désexcitant, ces atomes de l'atmosphère (oxygène, azote) émettent des photons dans le visible et dans l'ultraviolet. Les aurores ont l'aspect de grandes draperies colorées qui ondulent dans le ciel nocturne. Ce sont des phénomènes courants, qui se produisent même en période de Soleil calme. Elles ne sont généralement observables qu'aux environs des **cercles polaire**s[1] (nord et sud) formant ainsi un « ovale auroral ». En cas de très fortes éruptions solaires, les aurores peuvent être observées à des latitudes beaucoup plus basses (jusqu'à Lille !).

Une aurore polaire
(crédit :IMAGE/NASA)



Observation depuis l'espace d'une période de forte activité aurorale.

© LESIA / P. Moussette

Si les aurores sont sans danger, les éruptions solaires peuvent avoir des conséquences dramatiques pour nombre de systèmes industriels et technologiques.

Perturbations sur Terre causées par les éruptions solaires

Lorsque de très fortes **éruptions solaires**, l'intrusion brutale et massive de particules énergétiques dans l'environnement magnétique de la Terre induit des fluctuations importantes de son champ magnétique. Ces fluctuations induisent des champs électriques qui créent eux-mêmes des différences de potentiel notables sur les structures conductrices de grande dimension. Des courants induits vont s'écouler le long de ces structures conductrices, comme les lignes à haute tension, les oléoducs ou gazoducs, les câbles sous marins, etc. Voici deux exemples des dégâts causés aux activités humaines :

- Les centrales électriques fonctionnent très souvent en régime maximum (ou très proche du maximum). Un gros surplus de courant peut alors provoquer des surtensions dans les transformateurs et conduire à leur rupture totale. C'est ce qui s'est passé au Canada le 13 mars 1989 : en moins de 2 minutes, le Québec a été privé de la moitié de sa production électrique plongeant la population dans le noir pendant neuf heures.
- Les communications longues distances (radio par exemple) utilisent **l'ionosphère** comme « miroir » pour renvoyer les signaux vers la Terre. Lors de fortes éruptions, les courants ionosphériques sont perturbés, entraînant des perturbations des transmissions. Les grandes stations de radio françaises ont d'ailleurs des services chargés du suivi de l'activité solaire.

[1] Défini par la latitude à partir de laquelle il y a au moins une journée sans nuit et une journée sans jour au cours de l'année : par exemple, sur le cercle polaire nord, au solstice d'été aux environs du 21 juin, le Soleil ne se couche pas, et plus au nord, la période sans nuit dure plus longtemps en juin. Voir la fiche « Jour et nuit ».

Flux électromagnétiques et climat

Nous venons de voir les variations des flux de particules solaires et leurs effets sur Terre. Qu'en est-il des variations des flux électromagnétiques (flux de photons) liées aux variations de l'activité du Soleil ?

Intégré sur toutes les longueurs d'onde, le flux électromagnétique solaire présente de très faibles variations : de l'ordre de 0,1% au cours du cycle solaire. Ces variations sont insuffisantes pour expliquer les changements de température observés dans le cadre du réchauffement global.

En revanche, quand on les étudie **en fonction de la longueur d'onde**, on s'aperçoit que les flux électromagnétiques varient de façon importante au cours du cycle solaire et lors d'éruptions. C'est par exemple le cas pour les rayons X : des augmentations d'un facteur 1000 ou plus surviennent en l'espace de quelques minutes lors d'éruptions. Quant aux flux ultraviolets, ils peuvent augmenter de plus de 10% au cours du cycle solaire. Or le flux UV est responsable de l'état de la couche d'ozone. Mais ces variations sont liées à l'activité solaire et donc à un cycle de 11 ans.

La question du rôle du Soleil dans le réchauffement climatique doit être abordée du point de vue des échelles des temps et des cycles solaires. Mais ceci dépasse le cadre de cette fiche.

Résumé :

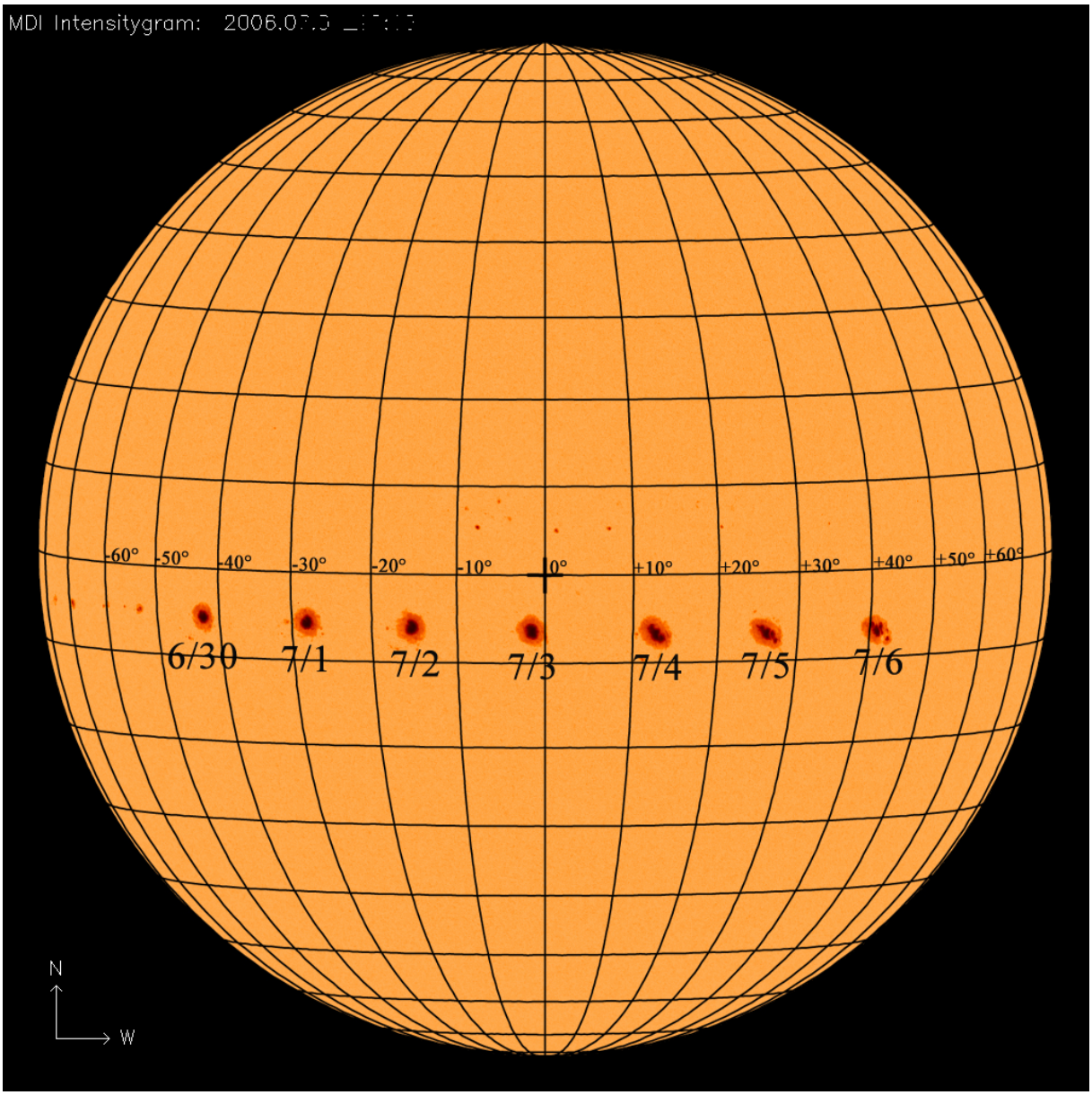
Les « taches » plus froides présentes sur la photosphère du Soleil varient en abondance en suivant un cycle de 11 ans. Lorsque le soleil est « actif » et présente de nombreuses tâches, la couronne est le lieu d'**éruptions** plus fréquentes. Elles libèrent énormément d'énergie sous la forme de rayons X et créent des ondes de choc dans le **vent solaire** (le flux de matière solaire éjecté en permanence par notre étoile). Le champ magnétique terrestre dévie la majorité du vent solaire, mais une partie interagit avec la haute atmosphère aux hautes latitudes, causant des **aurores boréales**. En période de soleil actif, ces ondes de choc perturbent la **magnétosphère** terrestre. Les perturbations du champ magnétique terrestre affectent les structures conductrices au sol, et les perturbations de **l'ionosphère** affectent les transmissions radio.

Annexe

- PT 2009 : La rotation du Soleil

Il existe des taches à la surface du Soleil. On peut utiliser leur mouvement pour calculer la vitesse de rotation du Soleil. La figure suivante montre une tache solaire observée du 30 juin au 6 juillet 2006 par le satellite SOHO, et le tableau donne la date et l'heure des observations. On a indiqué la longitude sur le disque solaire.

Date	Heure (h:min)
30/6	17:36
1/7	19:02
2/7	17:36
3/7	17:36
4/7	18:05
5/7	17:36
6/7	20:12

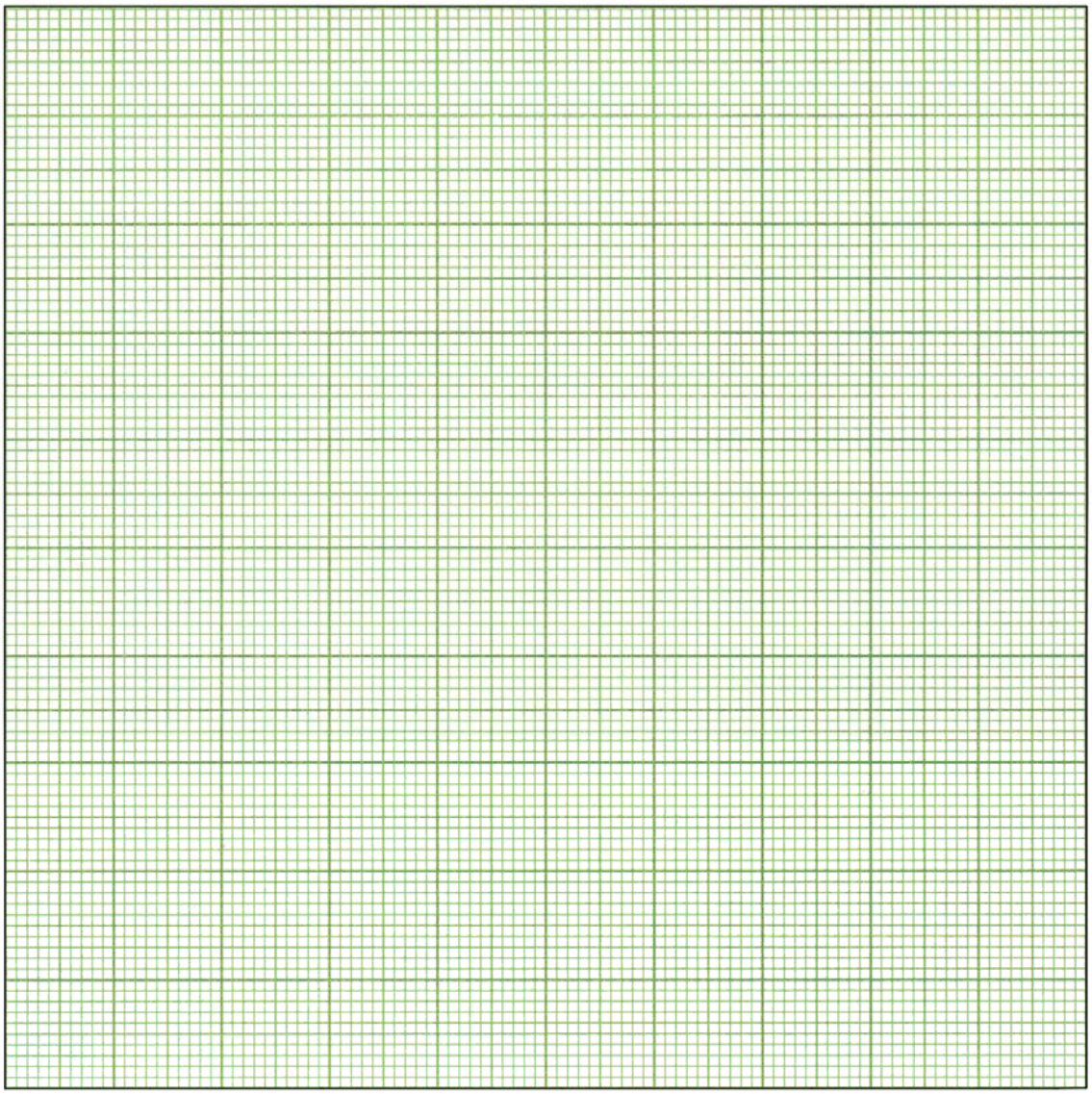


1) Prenez le 30 juin, 00:00 comme jour 0,000 : autrement dit, $\Delta t = 0{,}000$ pour le 30/6 à 00:00. Reportez Δt pour les autres observations dans le tableau 1.

2) Mesurez la longitude de la tache solaire pour chaque date indiquée, et reportez les valeurs dans le tableau 1.

Tableau 1 :

Temps	**Δt (en jours)**	**Longitude**
30/6 17:36	0,733	-42.2°
1/7 19:02		
2/7 17:36		
3/7 17:36		
4/7 18:05		
5/7 17:36		
6/7 20:12		

3) En utilisant les données du tableau 1, reportez la longitude (en degrés) en fonction du temps (en jours) sur le papier millimétré ci-dessous.

4) Tracez la droite de régression sur le graphique.
Calculez la pente de la droite de régression (utilisez les unités correctes).
Calculez la période de rotation du Soleil (utilisez les unités correctes).