

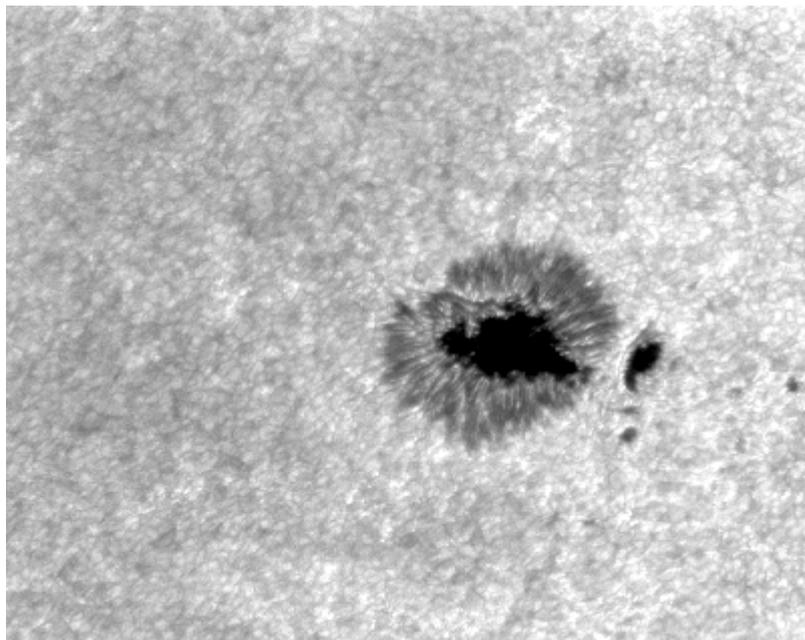
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :
Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »
Passer l'étape 2
Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

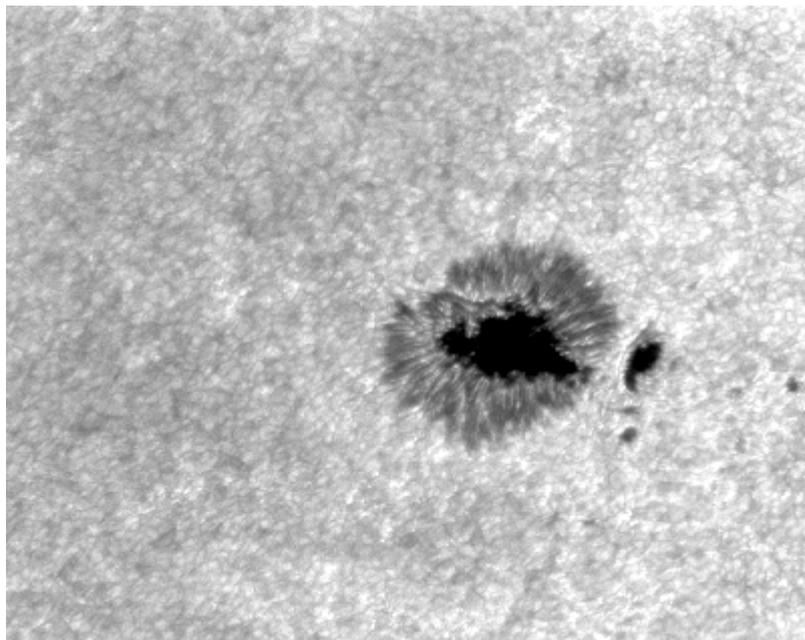
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :

Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »

Passer l'étape 2

Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

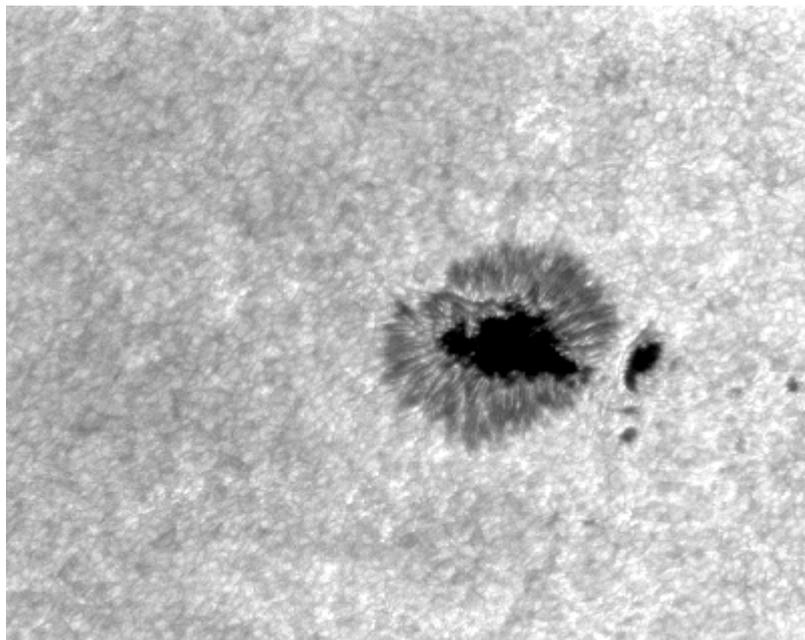
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :

Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »

Passer l'étape 2

Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

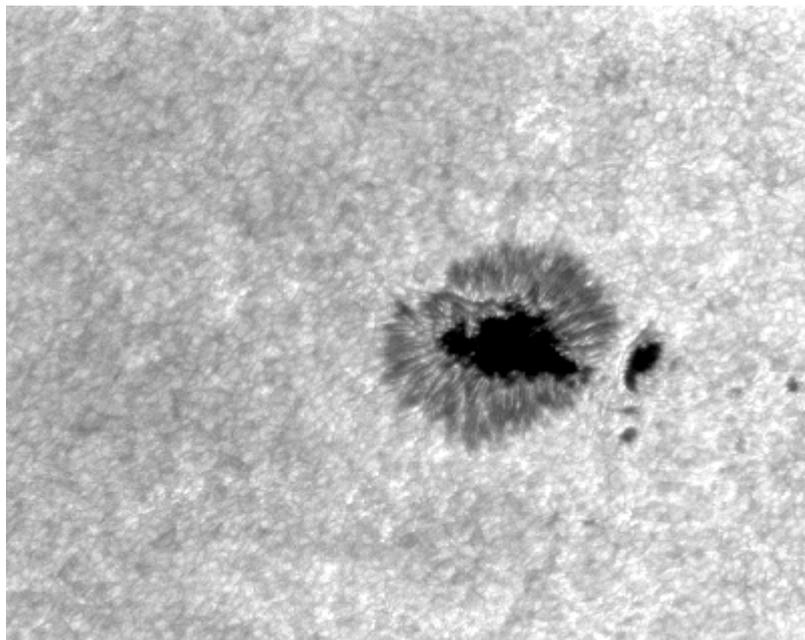
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :

Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »

Passer l'étape 2

Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

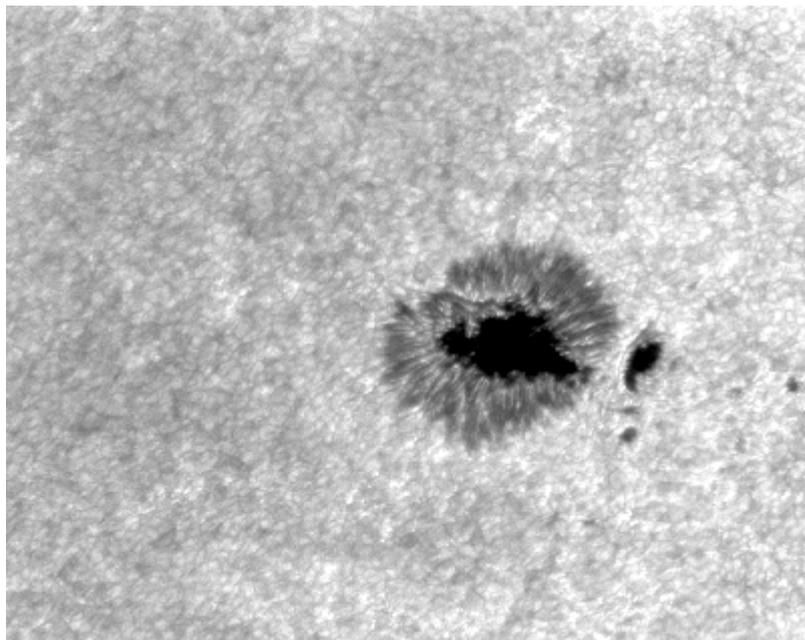
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :
Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »
Passer l'étape 2
Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

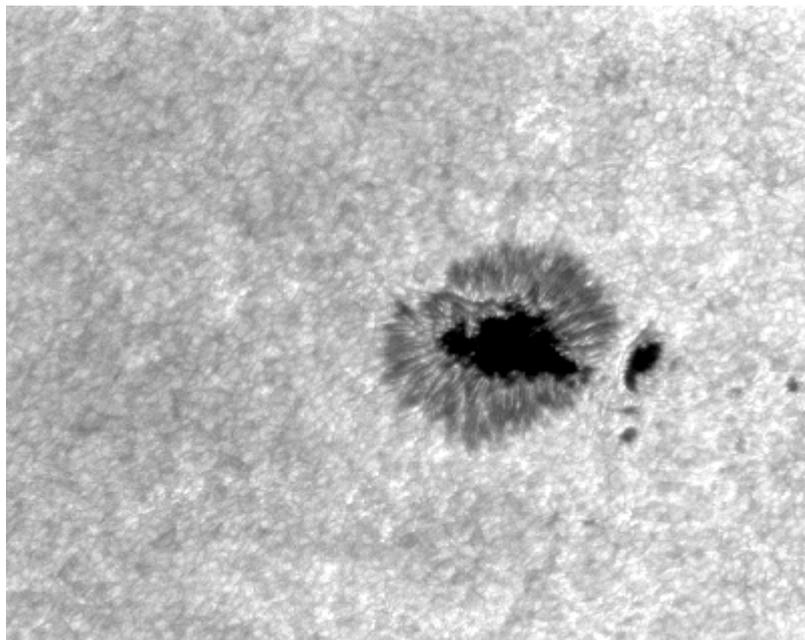
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :

Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »

Passer l'étape 2

Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

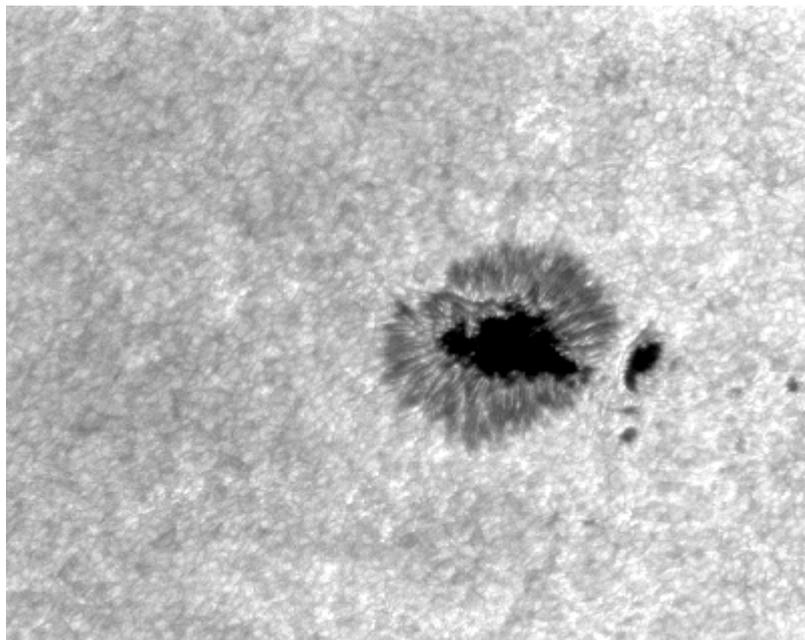
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :

Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »

Passer l'étape 2

Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

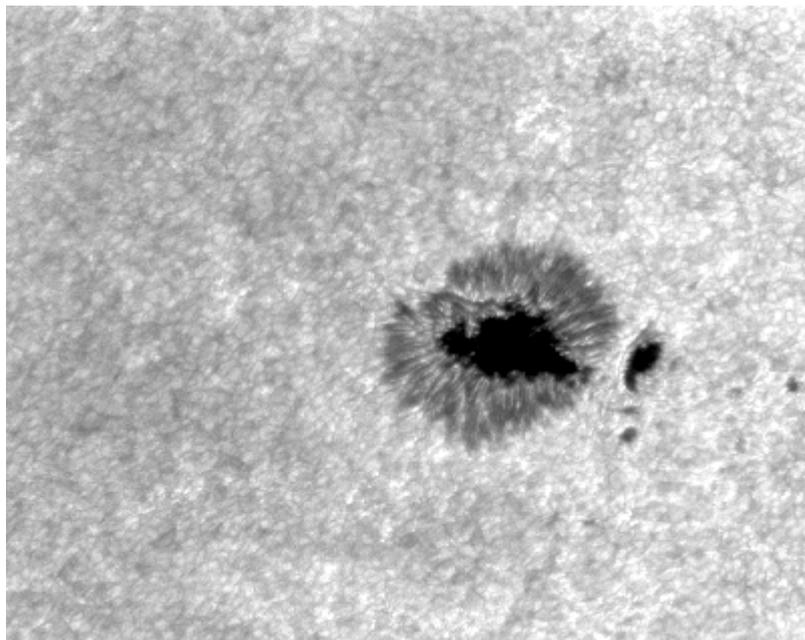
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :

Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »

Passer l'étape 2

Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

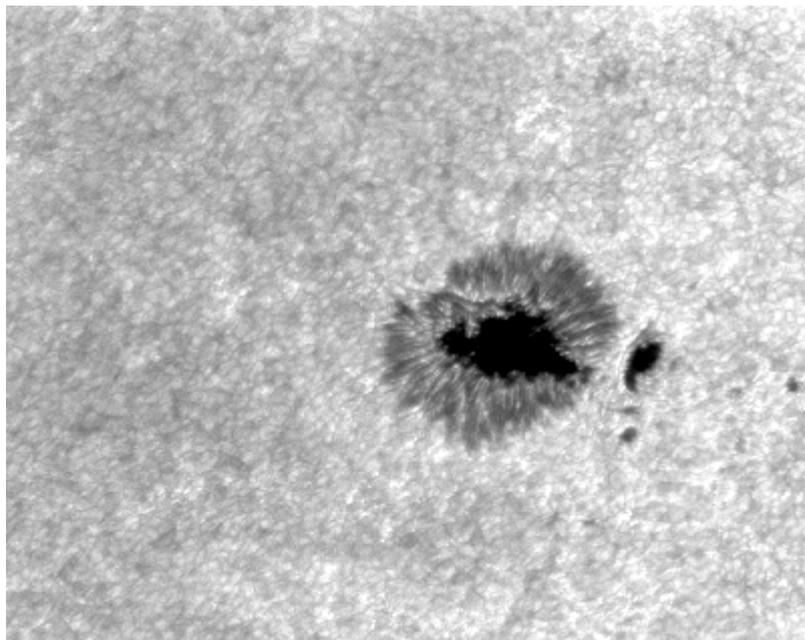
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :
Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »
Passer l'étape 2
Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

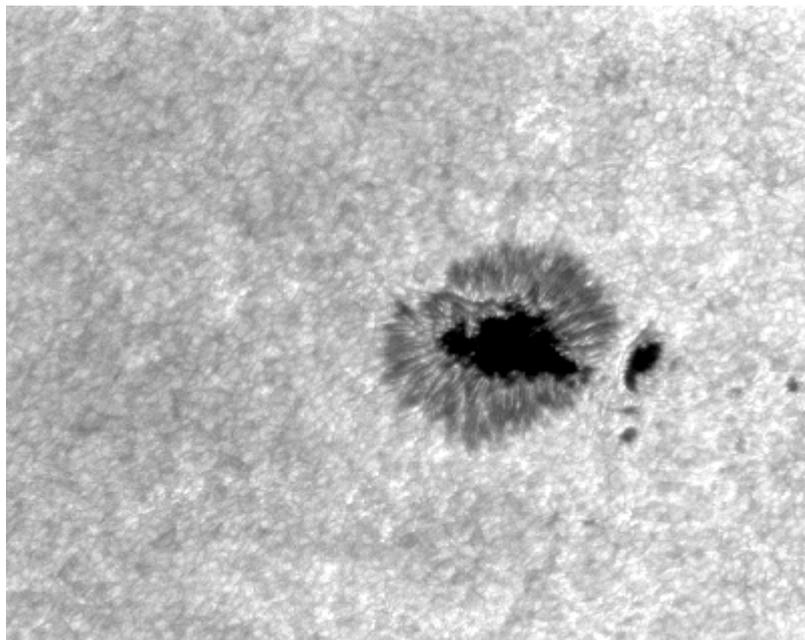
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :

Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »

Passer l'étape 2

Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

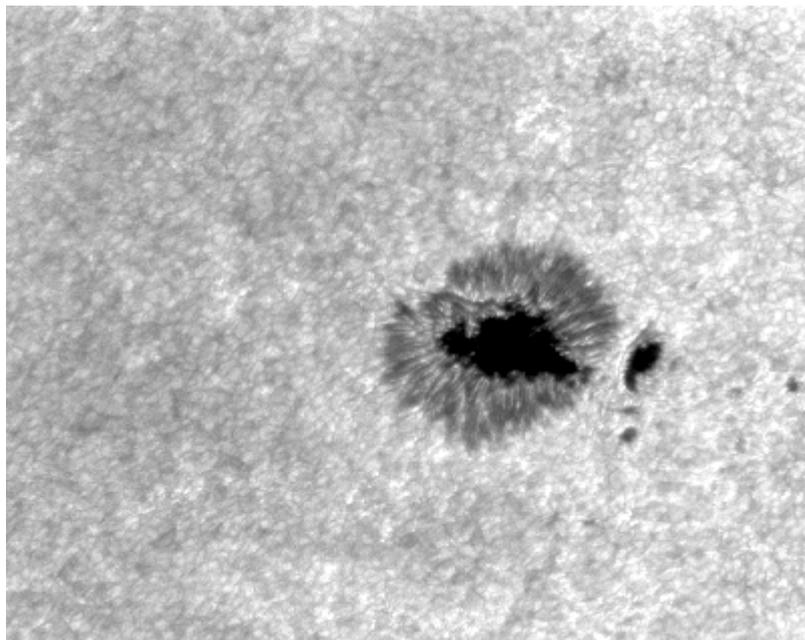
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :
Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »
Passer l'étape 2
Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

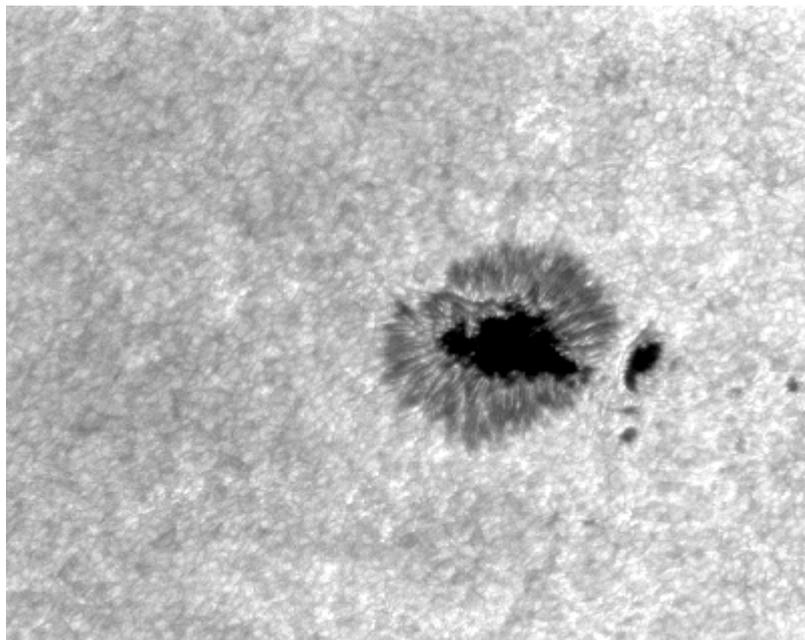
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :

Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »

Passer l'étape 2

Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

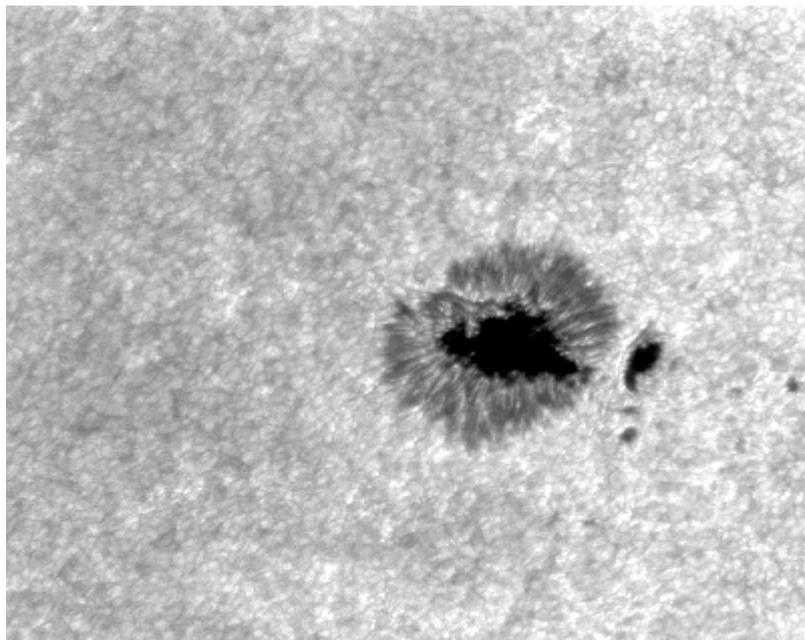
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :

Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »

Passer l'étape 2

Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

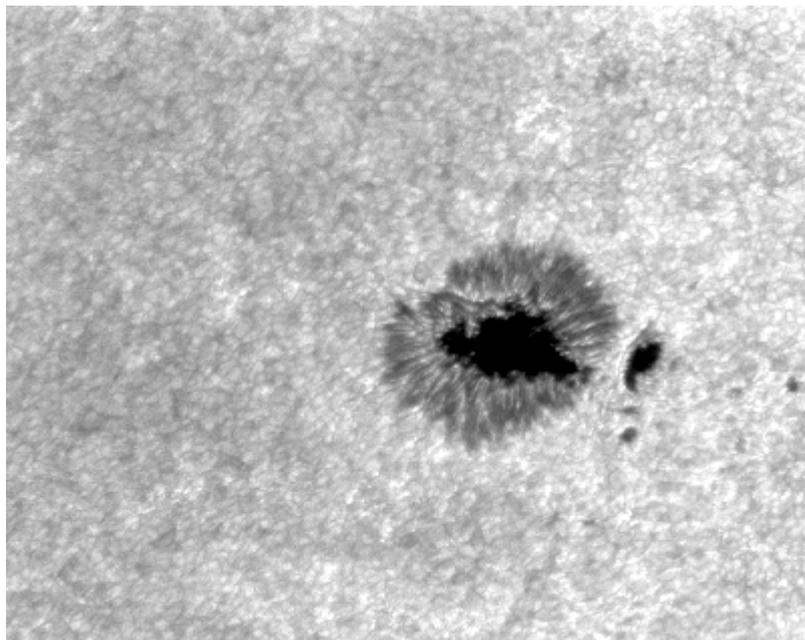
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :

Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »

Passer l'étape 2

Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

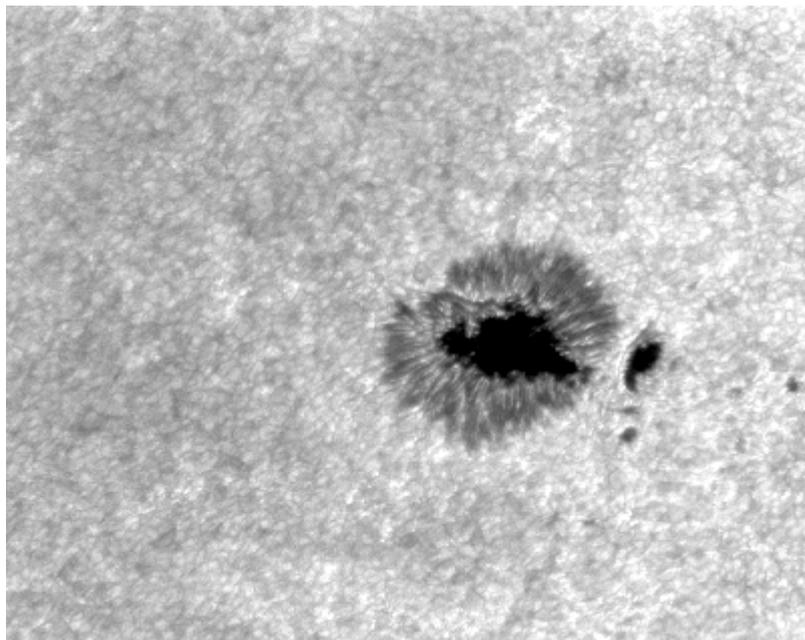
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :

Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »

Passer l'étape 2

Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

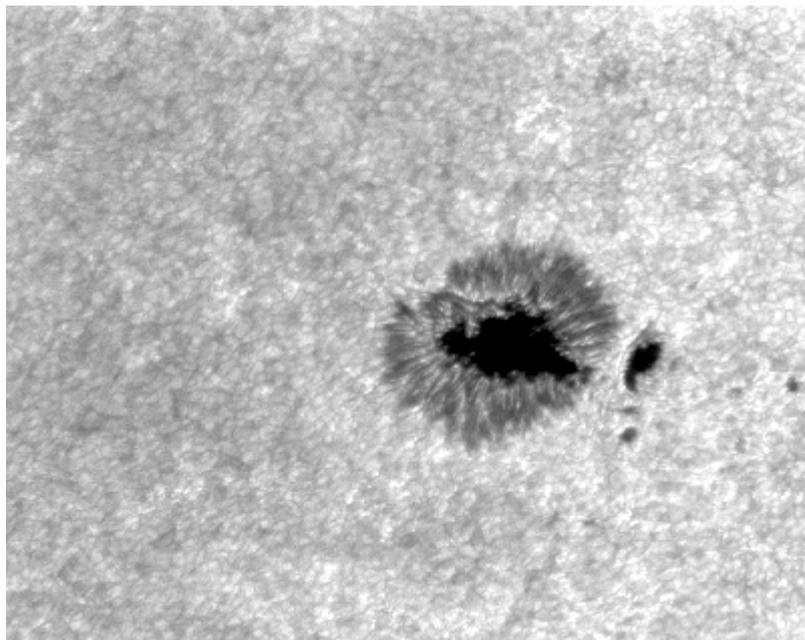
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :

Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »

Passer l'étape 2

Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

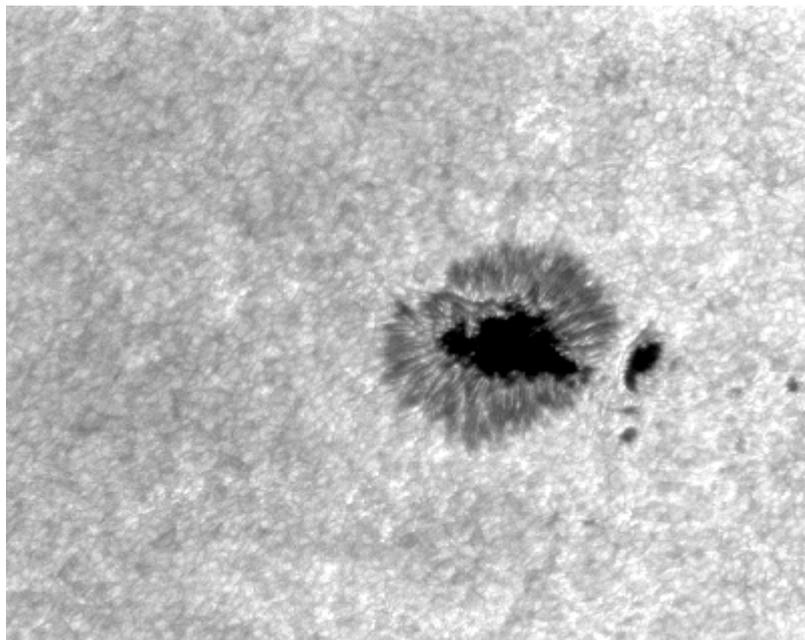
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :

Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »

Passer l'étape 2

Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

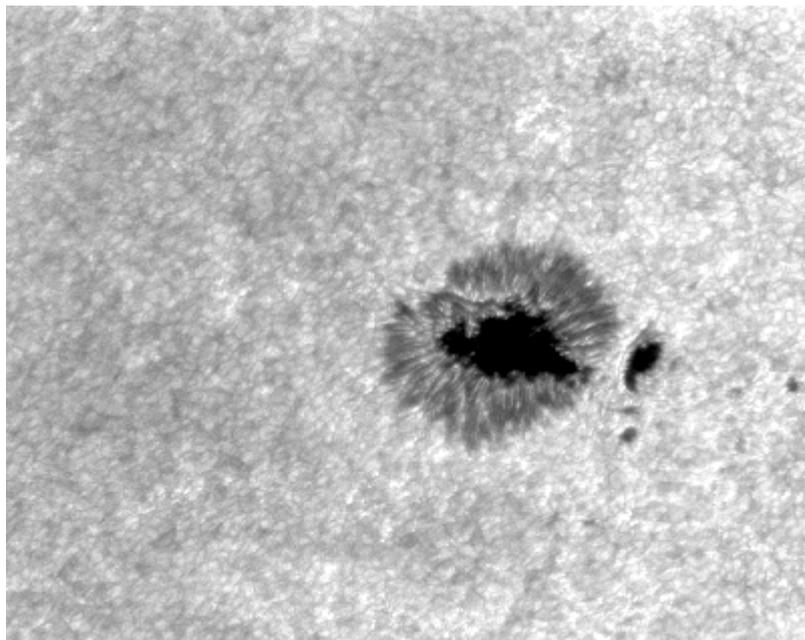
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :
Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »
Passer l'étape 2
Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

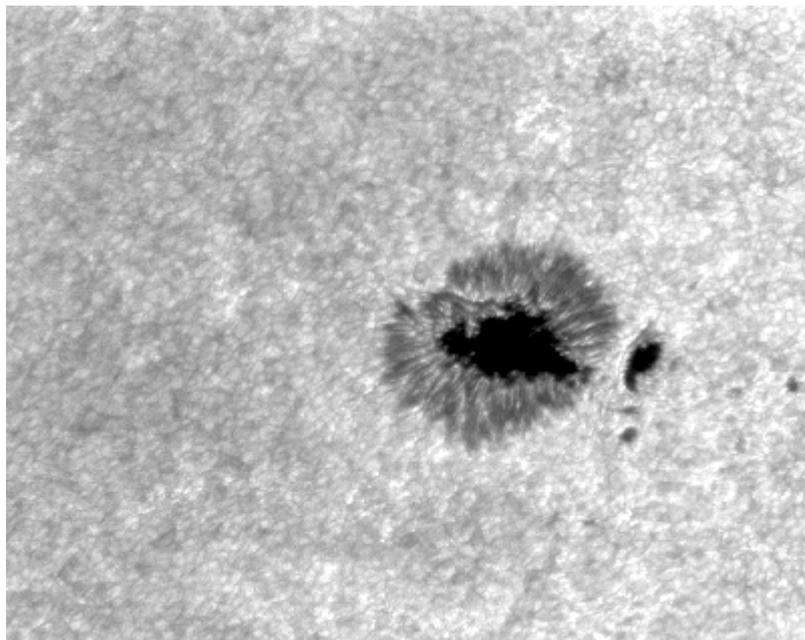
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :

Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »

Passer l'étape 2

Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

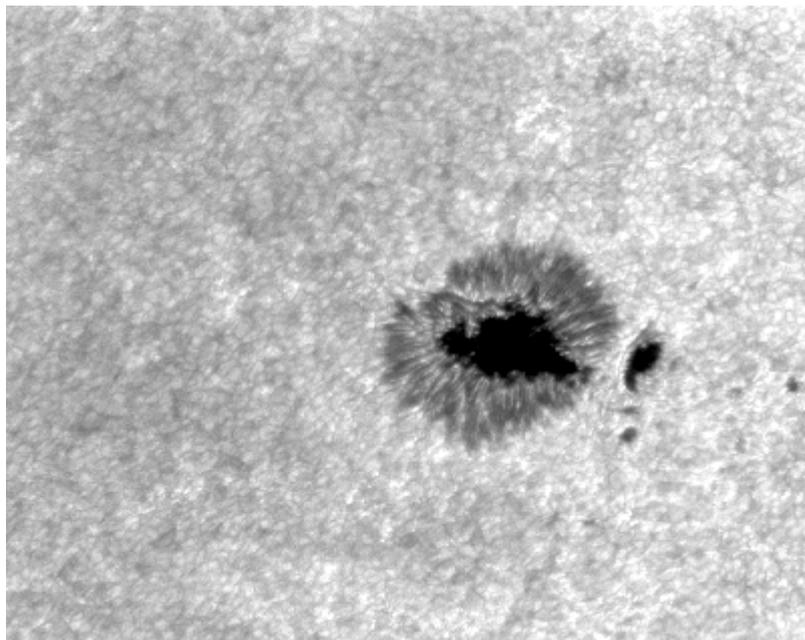
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :
Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »
Passer l'étape 2
Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

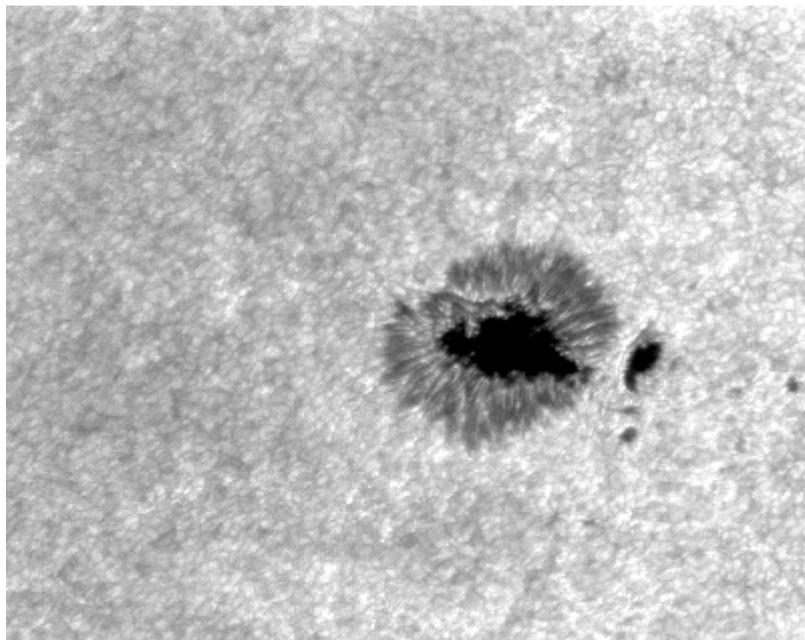
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :

Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »

Passer l'étape 2

Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

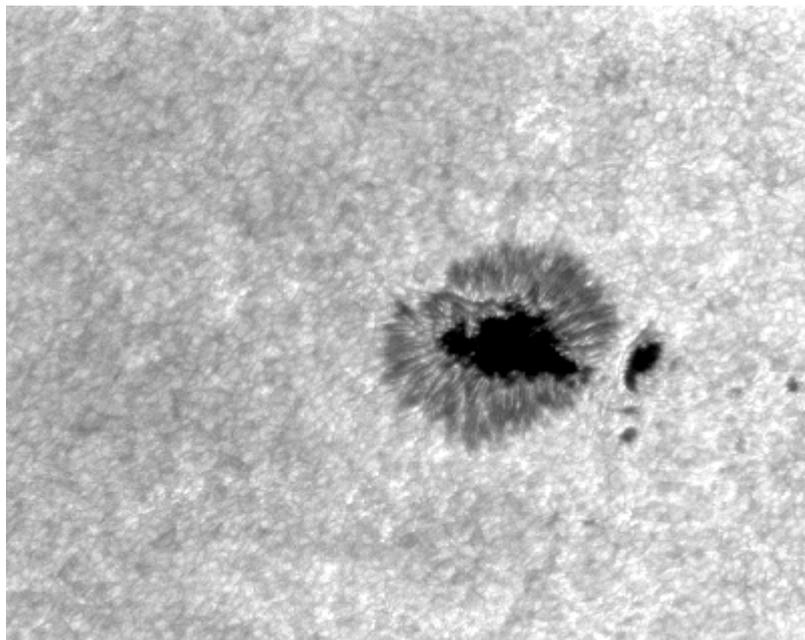
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :

Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »

Passer l'étape 2

Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

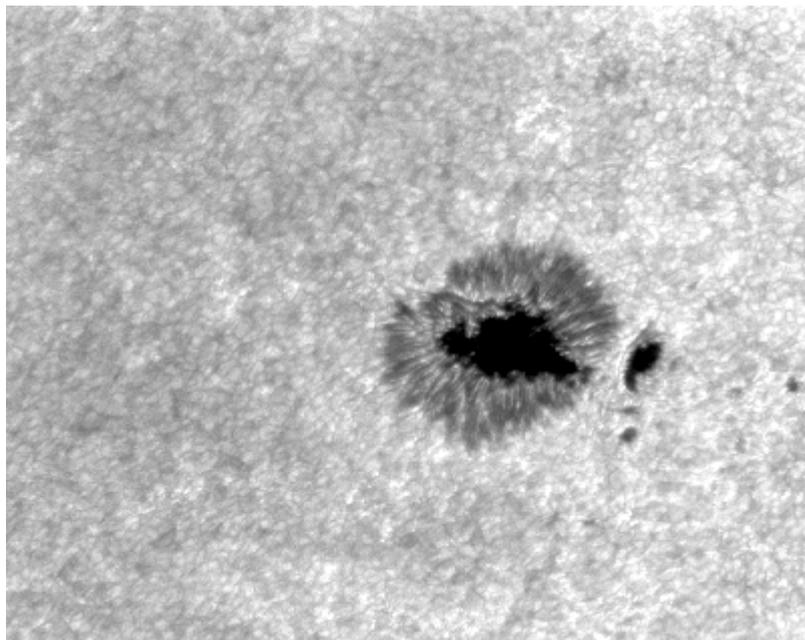
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :
Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »
Passer l'étape 2
Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

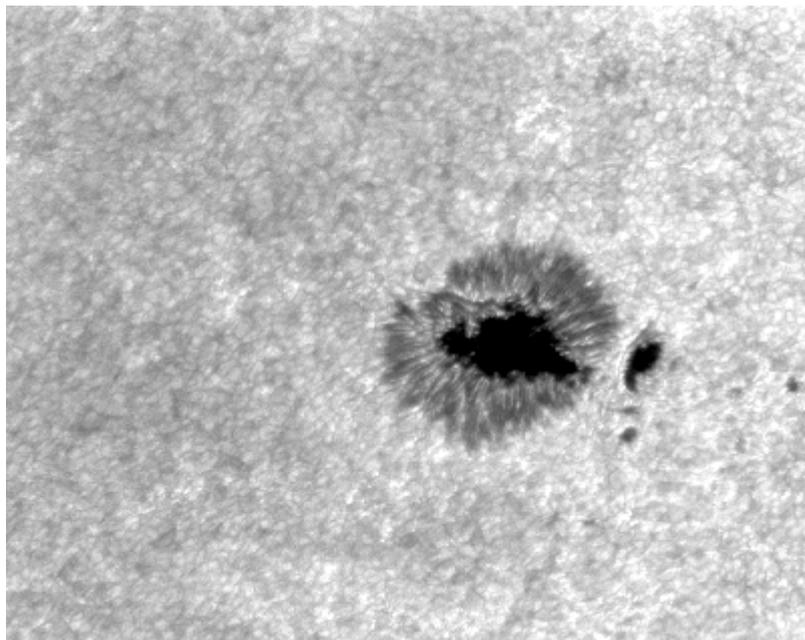
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :

Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »

Passer l'étape 2

Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .

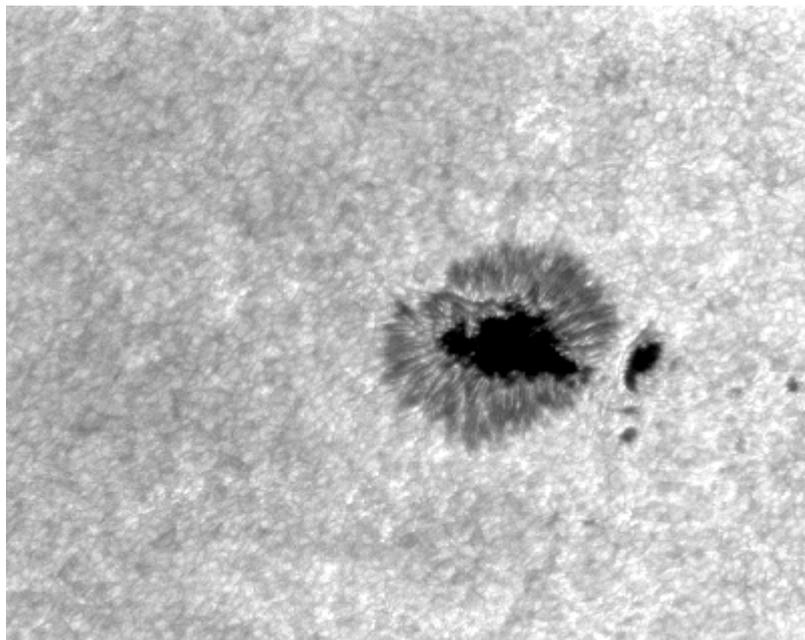
Rotation différentielle du Soleil par l'observation de taches solaires

Noël Robichon, Observatoire de Paris

Mise en évidence de la rotation du Soleil

L'essentiel de la lumière visible qui nous vient du Soleil est émis par la photosphère. C'est la couche la plus profonde de l'atmosphère et également la zone la plus froide, entre 6000 K et 4200 K. Elle s'étend sur environ 330 km de profondeur. La photosphère est composée de granules plus brillantes et plus chaudes que la moyenne de la photosphère entourées de zones inter--granules plus froides. Ces structures sont les témoins de la convection de la matière sous la surface visible. La durée de vie des granules est de l'ordre d'une dizaine de minutes.

En plus de ces structures, on distingue des zones beaucoup plus sombres et donc froides (environ 3900 K), de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres, appelées taches solaires. Elles sont le résultat de la déformation de boucles du champ magnétique interne qui sont déformées par la rotation différentielle du Soleil et atteignent l'atmosphère. Le champ magnétique intense dans les taches bloque le mouvement convectif et diminue les apports d'énergie, ce qui explique l'absence de granule et la température plus basse.



Gros plan d'un groupe de taches solaires. Remarquez également la structure granulaire de la photosphère hors des taches.

Les taches apparaissent généralement par couple de polarités opposées, les lignes de champ magnétique semblant se boucler de l'une à l'autre. Il existe également des taches isolées ainsi que des groupes complexes pouvant contenir plus d'une dizaine de taches.

La durée de vie des taches est variée de un à quelques mois, ce qui permet de suivre leur évolution sur plusieurs rotations solaires. C'est cette durée de vie qui va nous permettre de mettre en évidence et de mesurer la rotation du Soleil.

Mise en évidence de la rotation du Soleil

Nous allons utiliser le logiciel de traitement d'images GIMP.

Aller dans le répertoire Jour1/TPSoleil qui se trouve normalement sur le bureau. Vous y trouverez entre autres 10 fichiers images dont les noms des images sont sous la forme mkAAMMJJ.HHMMSS.gif avec AAMMJJ pour année, mois jour et HHMMSS pour heures, minutes, secondes.

Ces images ont été prises à l'Observatoire de Paris, sur le site de Meudon, en août 1990 lors d'un maximum d'activité solaire. Une grille de longitude et latitude avec un pas de 5 degrés et centrée dans la direction de l'observateur a été superposée pour permettre de mesurer la position des taches.

Ouvrir GIMP qui doit lui aussi se trouver sur le bureau.

Dans le menu « fichier » cliquer sur « ouvrir en tant que calques... ».

Sélectionner les

Cliquer sur « ouvrir ».

Les douze images seront ouvertes dans autant de calques.

Cliquer maintenant dans le menu « fichier » l'option « enregistrer sous ».

Changer le nom du fichier en « animation_Soleil.gif »

Dans la fenêtre qui s'ouvre, cliquer sur « enregistrer en tant qu'animation » puis sur « exporter ».

Dans la fenêtre « enregistrer en gif, choisir « boucle infinie » et un délai entre chaque image de 800 millisecondes puis enregistrer.

Laisser GIMP ouvert.

Admirer le fichier gif animé qui vient d'être créé, par exemple en l'ouvrant avec un navigateur web.

Mesure de la longitude des taches à différentes latitudes

Nous allons maintenant mesurer la vitesse de rotation des taches et essayer de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Pour cela, il faut mesurer précisément la position de taches à plusieurs latitudes et à plusieurs époques.

Pour faire précisément les calculs de vitesse de rotation des taches, nous allons utiliser le tableur de la suite OpenOffice : Calc.

Ouvrir le fichier feuille_taches.ods.

Les colonnes contiennent :

A : numéro de l'image

B : date et heure de l'observation préremplies

C : durée par rapport à la première date

D à G : mesures à effectuer sur les images pour la première tache

H : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

I à L : mesures à effectuer sur les images pour la deuxième tache

M : longitudes de la tache aux différentes dates. À calculer

La première chose à faire est de calculer la colonne C.

Puis revenir sous GIMP avec lequel nous allons faire les mesures à reporter dans les colonnes D à G et I à L.

Sous GIMP, dans la fenêtre « Calque, Canaux, Chemins,... », ne rendre visible que la première image (celle du 20 août 1990) en cliquant sur l'œil à gauche de chaque icône d'image pour le faire disparaître (sauf évidemment pour l'image mk900820.100800.gif).

Dans la fenêtre « boîte à outils », double-cliquer sur la loupe.

Choisir une belle tache que l'on peut suivre sur plusieurs jours.

Estimer grossièrement (à un ou deux degrés près) la latitude de la tache et la noter dans le tableau OpenOffice-Calc sous le label tache 1.

Cliquer sur la tache choisie autant de fois que nécessaire pour qu'elle apparaisse bien dans un des carrés du quadrillage en longitude et latitude.

Mesurer à l'aide de la grille superposée au disque solaire la latitude de la tache ainsi que sa longitude à différentes dates.

Déplacer la souris jusqu'au centre de la tache et noter dans le fichier OpenOffice-Calc la coordonnée horizontale en pixels de ce centre qui s'affiche en bas à gauche de la fenêtre de l'image. Noter également les coordonnées en pixels des deux bords de la case de coordonnées dans laquelle se trouve le centre de l'image ainsi que la longitude du bord gauche.

Masquer le calque de la première image, afficher la deuxième et recommencer pour la même tache. Noter que pour dézoomer, il suffit de cliquer en maintenant enfoncée la touche « control ». Recommencer pour les images suivantes jusqu'à ce qu'elle soit trop près du bord droit du Soleil pour être exploitable.

Calculer ensuite pour chaque tache, dans la case prévue à cet effet (colonne I), sa longitude en interpolant à partir de la valeur de la longitude du bord gauche de la grille et des valeurs en pixels des bords et du centre de la tache.

Recommencer ensuite pour une ou pour d'autres taches à d'autres latitudes.

Calcul de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation Ω est définie par $\Omega = \frac{dl}{dt}$ où l est la longitude. La période de rotation P est alors donnée par $P = 360/\Omega$. À partir des valeurs portées dans le tableau 1, on peut calculer la vitesse de rotation de plusieurs manière selon le niveau des élèves.

Première méthode :

La manière la plus simple consiste à prendre la différence des valeurs extrêmes de la longitude d'une tache et de la diviser par la durée séparant les taches. Par exemple, si la longitude d'une tache est $-48,04^\circ$ le 20/08/1990 à 10h08 et $2,65^\circ$ le 24/08/1990 à 06h56, la vitesse de la tache est $(2,65 - (-48,04))/(3,867) = 13,11^\circ/\text{jour}$ ce qui donne une période de rotation de $360/13,11=27,4$ jours.

Une estimation de l'erreur pourra être donnée si l'on connaît l'incertitude sur les mesures individuelles de la longitude. Si, par exemple, on donne les longitudes à un pixel près, l'incertitude sur la longitude de chaque tache pourra être calculée à partir de l'échelle de l'image dans la cellule de la grille contenant la tache, par exemple 36 pixels pour un pas de grille de 5° autour du centre de l'image soit une erreur de $0,14^\circ$. Si l'échelle est la même pour les deux dates, l'erreur sur la vitesse sera donc de l'ordre de $2 \times 0,14 / (3,867) = 0,07^\circ/\text{jour}$. La période sera donc comprise entre $360/(13,11+0,07)$ et $360/(13,11-0,07)$ c'est-à-dire entre 27,3 et 27,5 jours.

Deuxième méthode :

Elle consiste à tracer l'évolution de la longitude en fonction du temps et de faire une interpolation.

Pour ce faire, cliquer sur l'icône « diagramme » dans OpenOffice-Calc (celle représentant un petit histogramme en couleur dans la première ligne de la barre d'outils au dessus du tableau).

Dans la fenêtre « assistant de diagramme » faire ce qui suit (dans l'ordre) :

Cliquer dans l'étape 1 : « type du diagramme » sélectionner « XY (dispersion) »

Passer l'étape 2

Cliquer dans l'étape 3 : « séries de données ». Cliquer sur « ajouter » puis sur « nom ». Cliquer sur le bouton à droite du champ « plage pour le nom » et sélectionner à la souris les cellules F1 à F2. Cliquer ensuite sur « valeurs X » puis sur le bouton à droite du champs « plage pour valeurs X » et sélectionner les colonnes C1 à C10. Cliquer enfin sur « valeurs Y » puis sur le bouton à droite du champ « plage pour valeurs Y » et sélectionner les colonnes H1 à H10.

Un diagramme des longitudes de la première tache en fonction du temps apparaît alors. Pour ajouter la série des longitudes d'une autre tache, double-cliquer sur le diagramme puis cliquer droit et sélectionner « plages de données ». Recommencer alors la procédure précédente en sélectionnant les plages M1 à M10 dans le champ « plage pour valeurs Y ».

Pour tracer une droite de régression, cliquer sur un des points d'une des séries. Tous les points doivent alors être sélectionnés. Cliquer-droit sur un des point et sélectionner l'option « insérer une courbe de tendance... ». Dans la fenêtre « courbe de tendance » qui s'ouvre alors, choisir « linéaire » et « afficher l'équation ». Cliquer sur « OK » et la droite de régression s'affiche avec son équation. Le terme linéaire de l'équation n'est rien d'autre que la vitesse de la tache à partir de laquelle on peut facilement calculer la période de rotation comme vu précédemment. Il suffit de refaire la même chose avec l'autre tache pour calculer sa période. On vérifiera enfin que la période de rotation du Soleil à différentes latitudes est différente et que le Soleil tourne plus vite à l'équateur.

Quelques remarques sur la mesure de la position des taches :

La structure d'une tache évolue avec le temps, ce qui rend un peu délicat la mesure de sa position. Plutôt que de mesurer la position des bords de taches, il vaut mieux essayer de mesurer leur centre.

Évitez de mesurer des taches trop au bord du Soleil car l'effet de perspective rend la mesure de la longitude moins précise.

Remarque sur la période mesurée :

La Terre tournant autour du Soleil dans le même sens que la rotation du Soleil sur lui-même, les périodes que nous avons mesurées sont rapportées à un repère tournant à la vitesse de révolution de la Terre et dont un axe est dirigé dans la direction Terre-Soleil. Elles sont appelées périodes synodiques. Si l'on veut des périodes dans un repère absolu galiléen, ou périodes sidérales, il faut effectuer la correction suivante :

Appelons Ω , la vitesse angulaire de rotation de la Terre autour du Soleil, Ω_s la vitesse de rotation synodique que l'on vient de mesurer, c'est-à-dire par rapport à un repère tournant avec la Terre, et P_s la période synodique correspondante, et Ω_G la vitesse de rotation sidérale, par rapport à un repère galiléen, et P_G la période correspondante.

On a les relations :

$\Omega = 360/365,25$ °/jour, la Terre faisant un tour (360°) en un an (365,25 jours).

$$\Omega_s = 360/P_s \text{ °/jour}$$

$$\Omega_G = 360/P_G = \Omega_s + \Omega$$

ce qui donne :

$$P_G = \frac{365,25 P_s}{365,25 + P_s}$$

P_G est environ 7 % plus petit que P_S .