

Mesure de la rotation du Soleil par effet Doppler

Xavier Campi

Directeur de recherche honoraire au CNRS, ancien chercheur au LPTMS de l'Université Paris-Sud

Xavier Campi nous propose une mesure Doppler de la vitesse de rotation du Soleil effectuée avec le spectrographe à haute résolution de la Maison du Soleil de Saint-Véran. Cette description est précédée d'un bref rappel historique des observations sur la rotation du Soleil.

Historique

La mise en évidence de la rotation du Soleil a été concomitante avec la découverte par des savants des taches solaires et de leur mouvement. Cette découverte revient à plusieurs observateurs, dont le plus célèbre est Galileo Galilei, dit Galilée. Si Galilée ne fut probablement pas le premier à observer le phénomène, il fut cependant le premier à interpréter le mouvement des taches comme une rotation du Soleil.

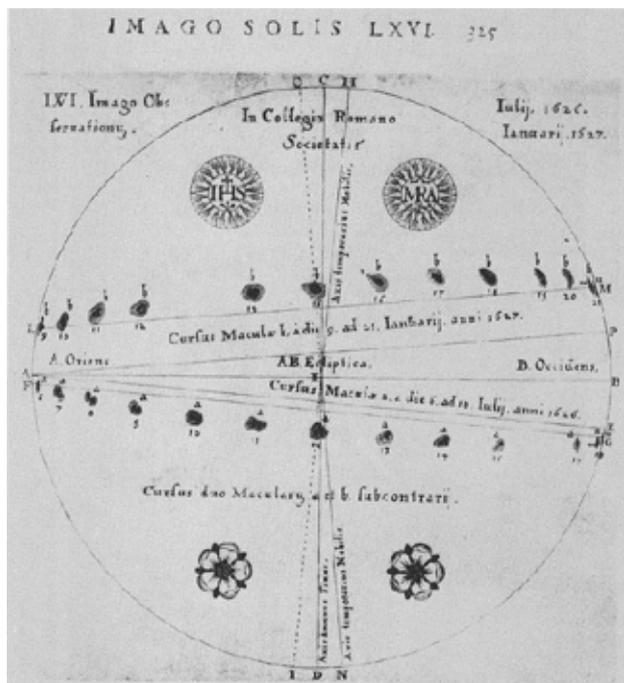


Fig.1. Observation du déplacement de deux taches solaires, faite par Christoph Scheiner. L'une en juillet 1626 et l'autre en janvier 1627. Remarquer les différentes inclinaisons de la trajectoire des taches par rapport à l'horizon terrestre (voir texte).

Pour Galilée, le fait que le Soleil tourne comme le fait la Terre, était une preuve supplémentaire de la validité du système de Copernic¹.

¹ Bernard Dame Galilée et les taches solaires 1610-1613
http://www.persee.fr/doc/rhs_00487996_1966_num_19_4_2508

Cette interprétation du mouvement des taches fut vivement combattue par le père jésuite Christoph Scheiner, qui par ailleurs avait fait des remarquables observations du mouvement des taches (figure 1). En 1863 l'astronome amateur Richard Carrington découvrit que les taches solaires tournent plus vite à l'équateur qu'aux pôles. Le premier à faire des mesures de la rotation du Soleil par effet Doppler fut l'astronome américain W.S. Adams en 1909².

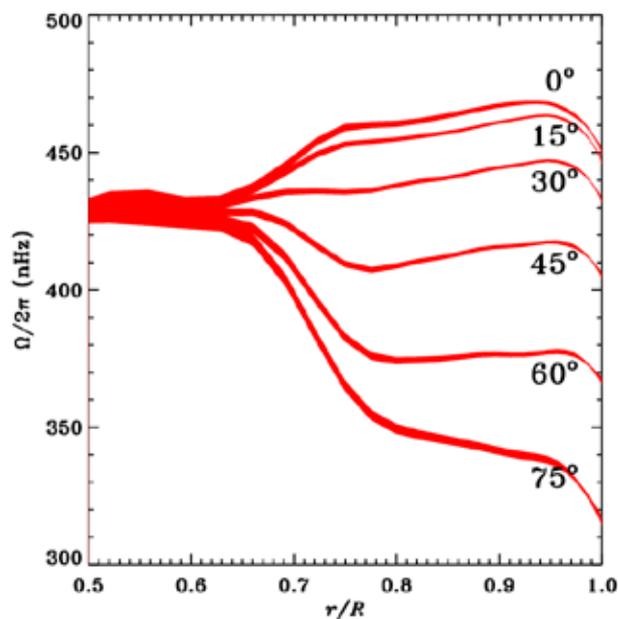


Fig.2. Périodes de rotation sidérale du Soleil en fonction de la latitude (0°-75°) et de la distance relative au centre³.

Actuellement, des observations héliosismologiques donnent accès à la vitesse de rotation à différentes latitudes et à celle des couches internes du Soleil (figure 2). Les modèles du Soleil qui rendent compte de ces résultats font appel à un mécanisme assez complexe de couplage entre la rotation et

² Adams, W.S. 1909, Astrophys. J. 29, 110.

³ http://www3.leibniz-kis.de/~mroth/helioseismologie4_engl.html

les phénomènes de convection. Cette *rotation différentielle* n'est pas encore entièrement comprise.

Estimation des qualités d'un spectrographe capable de mesurer la vitesse de rotation du Soleil

Faisons, en premier lieu, une estimation de la grandeur du décalage Doppler entre deux rayons provenant des deux limbes de l'équateur du Soleil. Le diamètre de celui-ci étant de $D = 1,39 \times 10^6$ km et la période de rotation par rapport à un repère galactique d'environ 25 jours, on trouve une vitesse de rotation d'environ $v_s = \pm 2$ km/s, mesurée respectivement aux deux limbes équatoriaux (figure 3).



Fig.3. Le Soleil et la Terre vus d'un point situé au-dessus du pôle Nord du Soleil. Les points E et O sont situés sur l'équateur solaire. On considère ici que la Terre est dans le plan de l'équateur solaire.

Le décalage Doppler résultant pour une longueur d'onde de $\lambda = 589$ nm (doublet du Na) doit donc être de $d\lambda = \lambda v_s / c = \pm 3,5 \cdot 10^{-3}$ nm. Mesurant *simultanément* les décalages aux deux limbes équatoriaux, on double le signal et en prime on élimine des erreurs systématiques. Ce décalage de 7×10^{-3} nm correspond à environ 1/100 de la séparation entre les deux raies du doublet du sodium.

Le *pouvoir de résolution spectrale* $R = \lambda/d\lambda$ d'un spectrographe définit sa capacité à discerner deux raies de longueurs d'onde λ et $\lambda + d\lambda$ adjacentes.

Prenant $d\lambda = 7 \times 10^{-3}$ nm et $\lambda = 589$ nm, on estime que la résolution nécessaire pour estimer quantitativement le décalage Doppler entre les deux bords équatoriaux du Soleil doit dépasser $R = 50\,000$. C'est une résolution assez élevée, qui n'est pas toujours disponible dans des petits observatoires. Nous allons décrire une mesure de ce décalage Doppler faite récemment avec un instrument accessible à une large communauté de praticiens de l'astronomie.

Le spectrographe SHARMOR de la Maison du Soleil de Saint-Véran (Hautes-Alpes)

La Maison du Soleil de Saint-Véran⁴ est un musée interactif dédié à la physique du Soleil et aux multiples relations que nous entretenons avec lui. Il

⁴ <https://saintveran-maisondusoleil.com>

dispose de nombreux équipements destinés à un large public et aussi d'instruments scientifiques de grande qualité. L'équipement concerné par l'expérience Doppler sur le Soleil a été fourni par l'Observatoire de Paris-Meudon. Il comporte un cœlostate, destiné à capter la lumière solaire et à l'envoyer à l'intérieur du bâtiment, un train de miroirs pour la transmission du rayonnement à l'intérieur de celui-ci, et un spectrographe. Cet instrument, dénommé SHARMOR (acronyme de Spectrographe Haute Résolution Meudon Orsay) est un spectrographe de type Czerny-Turner.

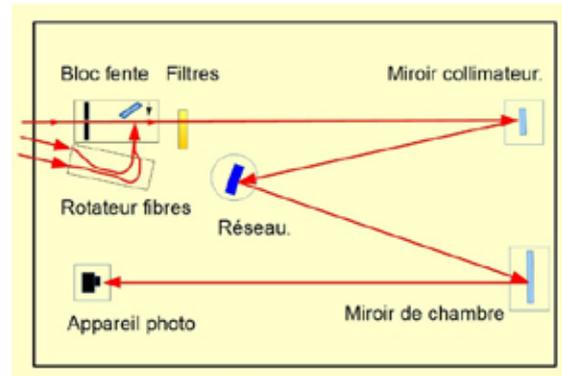


Fig.4. Schéma du spectrographe SHARMOR.

Suivant le parcours de la lumière, il comporte comme éléments principaux (figure 4) une fente ou un rotateur à fibres, une roue à filtres à bande étroite, un miroir collimateur de diamètre $D = 286$ mm et distance focale $F = 7\,380$ mm, un réseau de diffraction, un miroir de chambre de $D = 461$ mm et $F = 7\,400$ mm et un appareil photo numérique avec un capteur CMOS comportant $5\,472 \times 3\,648$ pixels carrés de $6,5 \mu\text{m}$. Le chemin optique entre la fente (rotateur) et le capteur est d'environ 28 mètres. Le tout est enfermé dans un grand caisson étanche à la lumière (figure 5).



Fig.5. Vue du caisson qui enferme le spectrographe SHARMOR, et qui affiche sur un panneau latéral un spectre du Soleil de 8 m de long. La porte située en bas à gauche de l'image montre la taille de ce spectre.

Le rotateur à fibres sert à capter simultanément la lumière aux deux bords du limbe solaire et à la

transmettre à l'intérieur du spectrographe (figure 6). Il se compose essentiellement d'un écran sur lequel se projette l'image du Soleil et de deux faisceaux de fibres optiques f_1 et f_2 . Ces deux faisceaux sont séparés sur l'écran de $D_f = 96$ mm. Comme l'inclinaison de l'équateur du Soleil par rapport à l'horizon terrestre varie au cours de l'année, cet ensemble peut tourner sur un axe perpendiculaire à l'écran. Dans la configuration actuelle, ce réglage se fait manuellement.

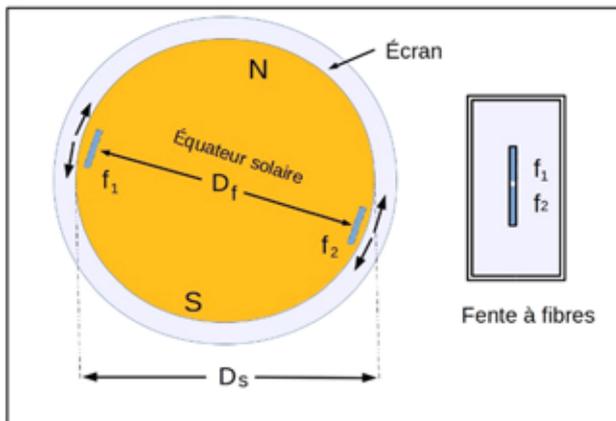


Fig.6. Schéma du rotateur à fibres (voir texte).

À l'autre extrémité des fibres et à l'intérieur du bloc fente, celles-ci sont placées bout à bout pour former une fente à fibres.

Le réseau de diffraction est la pièce maîtresse du spectrographe. La surface gravée mesure 204 mm par 408 mm, avec une densité de $d = 316$ traits/mm. Ce réseau est *blazé* (voir plus loin) à un angle $\theta_B = 63,4^\circ$. Le pilotage du spectrographe demande le positionnement du réseau dans un angle très précis ($\pm 0,05^\circ$). Un programme informatique spécifique écrit en Python a été développé pour le pilotage du moteur pas à pas qui assure ce positionnement.

Rappels sur la physique du réseau de diffraction

L'équation fondamentale du réseau de diffraction s'écrit $n\lambda = (s\sin\alpha + s\sin\beta)/d$, ou n est l'ordre d'interférence du spectre, α et β respectivement les angles d'incidence et d'émergence des rayons par rapport à la normale au réseau et d la densité de traits (figure 7). Dans la configuration du SHARMOR, α et β sont très proches (la distance entre les centres des deux miroirs est très faible par rapport à leur distance focale) et l'équation peut se réécrire comme $\theta = \arcsin(dn\lambda/2)$ avec $\theta = \alpha = \beta$ (configuration dite de Littrow). On remarque que les spectres correspondant aux différents ordres se superposent, d'où la nécessité d'intercaler des filtres à bande étroite pour sélectionner une longueur d'onde particulière.

L'angle de blaze θ_B est l'angle formé par la partie réfléchive des sillons avec le plan du réseau.

Il est choisi de manière à envoyer un maximum de l'énergie diffractée dans un ordre d'interférence donné. Cet ordre dépend de la longueur d'onde choisie.

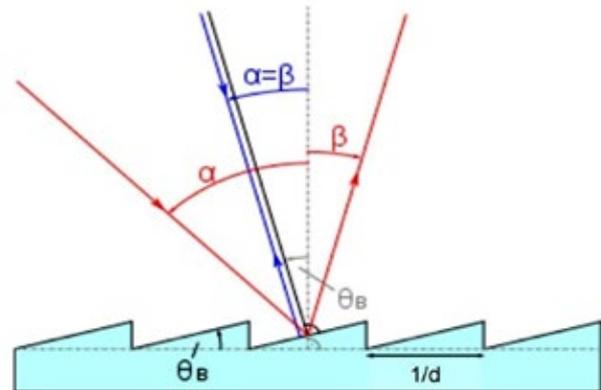


Fig.7. Réseau blazé. Cas général (rayons en rouge) ; configuration Littrow (id. en bleu).

Mesure du décalage Doppler

La résolution théorique d'un spectrographe est donnée par $R = N \times n$, ou N est le nombre de traits qui sont éclairés sur la surface du réseau. Avec les données instrumentales indiquées plus haut, la résolution théorique du SHARMOR est de l'ordre de $R = 10^6$ et donc bien adaptée à notre projet.

L'expérience commence par le positionnement optimal des fibres sur l'image du Soleil. On procède ensuite à l'ajustement de l'angle d'incidence sur le réseau. Nous avons choisi de travailler sur le spectre d'ordre $n = 9$, qui fournit pour la longueur d'onde du doublet du sodium l'angle d'incidence le plus proche de l'angle de blaze. Un filtre de 10 nm de bande passante centré sur 590 nm est automatiquement positionné après le bloc fente (figure 4). La prise de vue d'images spectrales s'effectue ensuite, avec des poses de l'ordre de la fraction de seconde (figure 8).

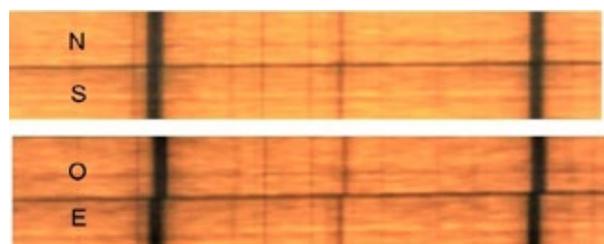


Fig.8. Images spectrales du doublet du sodium. Fibres positionnées sur les pôles Nord et Sud du Soleil (haut), et sur les limbes Ouest et Est à l'équateur du Soleil (bas).

Avec la configuration décrite plus haut, le doublet du sodium occupe la quasi totalité du champ de l'image

photographique. De cette image, on extrait le profil spectral (figure 9) et on procède ensuite à son étalonnage en longueur d'onde, utilisant l'écartement bien connu ($0,5970 \text{ nm}$) des deux raies du doublet du sodium. La dispersion trouvée est de $1,780 \times 10^{-4} \text{ nm}$ par pixel.

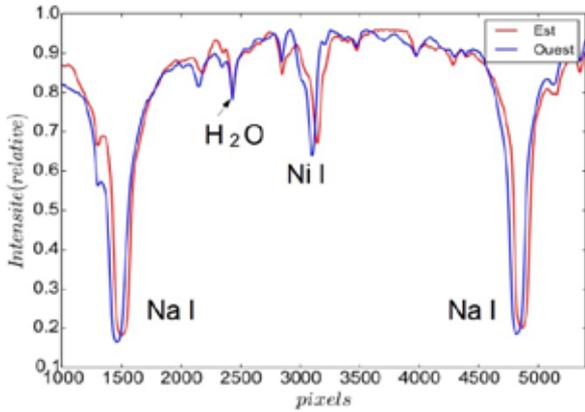


Fig.9. Profil spectral du doublet du sodium. Fibre sur limbe équateur Est (rouge) ; idem Ouest (bleu).

Sur la figure 9, on observe clairement le décalage sur les deux raies du doublet. Par ailleurs, on remarque plusieurs autres raies plus fines et moins intenses. Certaines de ces raies ne montrent pas de décalage, car elles résultent de l'absorption de la lumière solaire par l'atmosphère terrestre. Pour la mesure du décalage Doppler nous avons utilisé la raie du Ni I qui se trouve à $589,288 \text{ nm}$ ⁵.

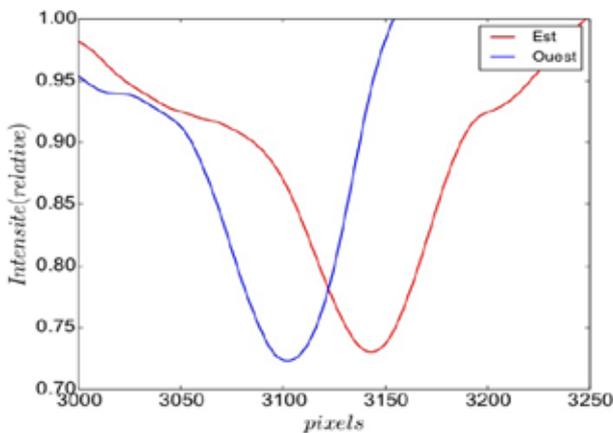


Fig.10. Profil spectral de la raie du Ni I. Fibre Est (rouge) et fibre Ouest (bleu).

Prenant les minima des deux pics, on mesure un décalage de 41 pixels (figure 10), ce qui, traduit en longueur d'onde, correspond à $7,31 \cdot 10^{-3} \text{ nm}$ et en vitesse à $v_{\text{obs}} = 1,85 \text{ km/s}$. L'incertitude est de l'ordre de $\pm 0,06 \text{ km/s}$ (1 pixel).

Cette vitesse doit être corrigée d'un biais instrumental. Le diamètre du disque solaire projeté sur la platine d'entrée du rotateur à fibres était le jour de l'observation (le 7 juin 2017) de $D_s = 108 \text{ mm}$. Comme les fibres f_1 et f_2 sont distantes de $D_f = 96 \text{ mm}$ nous devons corriger cette valeur d'un facteur $D_s/D_f = 1,09$. Appliquant cette correction, on obtient pour vitesse de rotation du Soleil à l'équateur de $v_s = 2,02 \pm 0,06 \text{ km/s}$. Par ailleurs, la vitesse observée sur Terre est la composante radiale de v_s , $v_{\text{obs}} = v_s \times \sin(i)$, où i est l'angle formé par la ligne de visée Terre-Soleil avec l'axe de rotation du Soleil. Cet axe est incliné de $7,25^\circ$ par rapport à la perpendiculaire au plan de l'écliptique. La Terre ne se trouve sur le plan de rotation du Soleil que deux fois par an, vers la fin de la première semaine de juin, et six mois plus tard, vers la fin de la première semaine de décembre. À la date de notre observation, cette correction est donc négligeable.

La valeur de $v_s = 2,02 \pm 0,06 \text{ km/s}$ est très proche de celles que l'on trouve dans la littérature récente.

Par exemple, $T = 450 \text{ nHz} = 25,3 \text{ jours}$ et $v_s = 2,01 \text{ km/s}$, sur le site indiqué note 3 page 12.

Remarques finales

Une extension naturelle de cette expérience Doppler faite avec le SHARMOR, serait la mesure des décalages à des latitudes solaires plus élevées. Ou encore la mesure de décalages pour d'autres raies, comme par exemple la raie d'émission chromosphérique de l'hélium, qui se trouve à $\lambda = 587,6 \text{ nm}$. La Maison du Soleil doit être, par vocation, ouverte à toute proposition d'expérience qui puisse exploiter les capacités de cet instrument exceptionnel qu'est le SHARMOR.

L'auteur remercie Norbert Champion, Paul Felenbok et Jean Guérin, membres de l'Observatoire de Paris-Meudon, avec lesquels il a participé à la mise en place du spectrographe et à la réalisation de cette expérience.

Cette belle expérience nous a donné l'idée d'en faire un exercice utilisable en classe, que vous trouverez page suivante.

⁵ The Solar Spectrum 2935 Å to 8770 Å Monograph 61 National Bureau of Standards USA.

Une mesure originale de la distance du Soleil

Comme tous les astres, le Soleil tourne sur lui-même. Il existe deux manières de s'en apercevoir, par l'observation des taches solaires ou par la spectroscopie. Ces deux méthodes permettent de déterminer un ordre de grandeur de la distance du Soleil.

Première partie, la spectroscopie

Lorsqu'on vise le Soleil avec un spectroscopie, on observe des raies d'absorption dans son spectre. Si on vise plus précisément deux points E et O de l'équateur solaire (figure 1), on remarque que les raies d'absorption sont décalées par effet Doppler-Fizeau (figure 2).

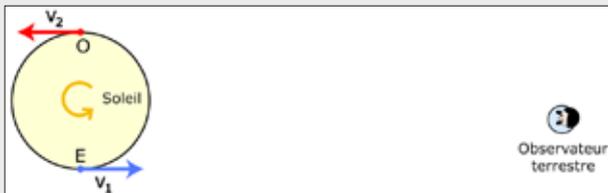


Fig.1. Le Soleil et la Terre vus depuis un point situé au-dessus du pôle Nord du Soleil. Le point E situé sur l'équateur du Soleil (côté est) s'approche alors que O (côté ouest) s'éloigne. On suppose ici que la Terre est dans le plan de l'équateur solaire.



Fig.2. Images spectrales du doublet du sodium. En haut, le spectre obtenu en visant le point O est décalé vers le rouge alors qu'il est décalé vers le bleu pour le point E.

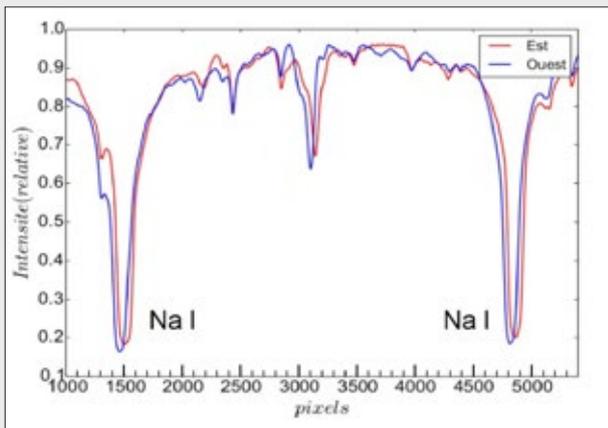


Fig.3. Le spectre de la figure 2 sous forme de courbe d'intensité lumineuse. Les deux raies du sodium sont les plus sombres.

Les longueurs d'onde du doublet du sodium sont 589,592 nm et 588,995 nm.

1. Déterminer l'échelle du graphique 3 en nm/pixel.
2. Identifier sur la figure 3 le nickel sachant qu'une des raies d'absorption est à 589,288 nm.
3. Mesurer sur la figure 4 le décalage sur la raie du nickel en pixels puis convertir en nm de longueur d'onde.

4. En déduire la différence de vitesse entre les points E et O. On rappelle la formule de l'effet Doppler-Fizeau :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

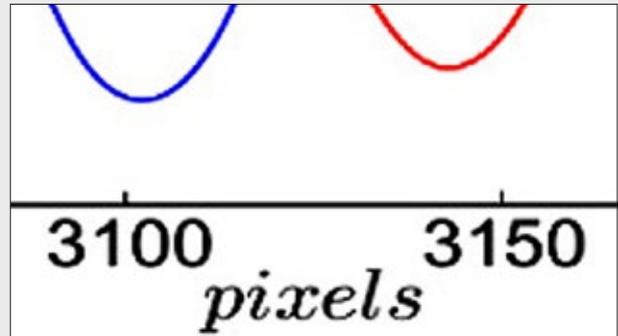


Fig.4. Agrandissement de la figure 3 pour la raie du nickel, avec ici, une échelle de 1 mm pour chaque pixel du spectre.

Le spectroscopie ne visant pas exactement les extrémités d'un diamètre solaire, il conviendra de multiplier par 1,09 le résultat obtenu avec la formule ci-dessus. En déduire V_1 en km/s (penser à diviser par 2).

Question supplémentaire

Expliquer pourquoi l'une des raies d'absorption n'est pas décalée sur la figure 3. On pourra mesurer sa longueur d'onde et l'identifier en cherchant sur Internet *The Solar Spectrum 2935 Å to 8770 Å*.

Deuxième partie, les taches solaires

Si on observe le Soleil avec un filtre adapté, on peut voir des taches sombres à sa surface. Ces taches se déplacent de jour en jour, ce qui a permis dès le début du 17^e siècle de comprendre que le Soleil tourne sur lui-même.

La période varie en fonction de la latitude des taches, elle est plus longue vers les pôles (plus de 30 jours) qu'au niveau de l'équateur (environ 26 jours).

5. On appelle R le rayon du Soleil. On demande de calculer la vitesse V_1 de la figure 1 en fonction de R, sachant que la période de rotation est de 26 jours.

Troisième partie, la conclusion

6. Calculer le rayon du Soleil à partir des deux réponses précédentes.
7. Depuis la Terre, on observe un diamètre solaire sous un angle de 0,53°. En déduire la distance du Soleil.

Les résultats

1. 0,00017768 nm/pixel
3. 0,0073 nm
4. $v : 3,7 \text{ km/s}$ et $V_1 = v \cdot 1,09/2$ soit $2,04 \text{ km/s}$

Question supplémentaire : H_2O (dans l'atmosphère terrestre)

5. $2\pi R / (25 \cdot 24 \cdot 3600)$
6. 703 000 km
7. 152 000 000 km pour la distance du Soleil