

Le coronographe de Bernard Lyot au Pic du Midi

par Emmanuel Davoust
Astronome à l'Observatoire Midi-Pyrénées



Figure 1 : Bernard Lyot (1897-1952), au télescope Baillaud de l'Observatoire du Pic du Midi en 1937 (Bibliothèque de l'Observatoire de Paris, photo Émile Vinet)

UN SAVANT ORIGINAL

Bernard Lyot est né à Paris en 1897. À la sortie de l'École supérieure d'électricité en 1917, il obtient un poste de préparateur à l'École polytechnique. Alfred Perot¹, dont il est l'assistant, l'introduit à l'Observatoire de Meudon où il obtient un poste d'assistant en 1920. Après sa thèse en 1929, il se consacre principalement à la construction et au perfectionnement de "coronographes" pour l'observation de la couronne solaire. Il meurt prématurément en avril 1952, au cours d'une expédition d'observation d'une éclipse de Soleil au Soudan.

Lyot était d'abord un ingénieur de talent, doué en outre d'un sens physique remarquable, comme le montrent tous les instruments innovants qu'il a construits dans sa carrière. L'un des premiers est sans doute le petit poste à

1. Alfred Perot (1863-1925) : physicien français, polytechnicien, actif dans le domaine de l'optique et de l'astronomie, connu pour son invention avec Charles Fabry de l'"interféromètre de Fabry-Perot".

galènes miniature qu'il met dans un chapeau melon, et avec lequel il se promène sous la tour Eiffel pour en capter les émissions. Sa thèse porte sur la réalisation d'un polarimètre pouvant détecter des niveaux de polarisation de l'ordre du millième. L'invention du coronographe en 1930 lui confère une réputation internationale et lui offre une place à l'Académie des Sciences en mars 1939. La conception d'un télescope sans coupole² pour le Pic du Midi, un projet peu connu des années 1940, montre bien son talent d'inventeur sans *a priori*, en avance de cinquante ans sur son temps.

Il monte au Pic du Midi de Bigorre pour la première fois en juillet 1929, probablement sur les conseils de son collègue Fernand Baldet³, qui y a observé la planète Mars. Il y effectue des mesures de polarisation de la lumière solaire réfléchie par la surface de Mercure avec le polarimètre qu'il vient de mettre au point⁴. Ce séjour confirme la renommée du Pic pour les bonnes images, et donne à Lyot l'idée de son projet instrumental suivant.

LES DIFFERENTES CAUSES DE DIFFUSION DE LA LUMIERE SOLAIRE DANS L'OBSERVATION TELESCOPIQUE

Faisant le bilan de cinquante ans de tentatives pour observer la couronne solaire en dehors des éclipses, le physicien allemand Hans Kienle (1895-1975) conclut en 1929 que « les tests ont prouvé sans ambiguïté l'impossibilité de photographier la couronne solaire de jour ».

Cette même année, au Pic du Midi, Lyot analyse méticuleusement les différents obstacles à la coronagraphie, dus à la diffusion de la lumière solaire dans l'atmosphère terrestre et dans l'instrument, et parvient à la conclusion opposée. La diffusion moléculaire (ou diffusion de Rayleigh) dans l'atmosphère n'est pas véritablement un obstacle, parce que le fond de ciel est à peu près aussi brillant que la couronne :

La diffusion moléculaire seule ne suffit donc pas pour masquer entièrement la couronne intérieure, elle doit seulement affaiblir ses contrastes.

Cette diffusion est considérablement plus faible au Pic du Midi qu'en plaine. Le ciel y est d'un bleu profond. La diffusion par les grosses particules de

2. Certains télescopes récents ou en projet ont une coupole qui se rétracte ou se replie pendant les observations, supprimant ainsi une source locale de turbulence qui trouble les images.

3. Fernand Baldet (1885-1964) : astronome français, a observé Mars depuis le Pic du Midi, et a contribué à infirmer l'hypothèse des « canaux martiens », susceptibles d'indiquer une vie sur la planète.

4. On sait que la lumière solaire n'est pas polarisée à l'origine, mais le devient après réflexion.

l'atmosphère (ou diffusion de Mie) au voisinage immédiat du Soleil est nettement plus gênante, parce que les rayons diffusés restent voisins des rayons incidents et créent une auréole brillante autour du Soleil. Toutefois, comme le note Lyot, elle s'atténue nettement avec l'altitude : au Pic du Midi, l'auréole de lumière diffusée entourant le Soleil peut n'être que deux fois plus brillante que la couronne.

Ce halo de lumière qui environne le Soleil est dû à la diffraction des rayons solaires par quelques poussières ou par quelques nébulosités en suspension dans l'air ; un voile de cirrus très ténu, parfois même complètement invisible, suffit parfois pour le produire (...) Pourtant, sur les sommets élevés des montagnes, lorsqu'il n'y a pas de cirrus et que l'air a été purifié, par une chute de neige par exemple, cette cause de lumière parasite disparaît presque complètement. Au Pic du Midi, la brillance du ciel, près du bord solaire, devient parfois inférieure au double de celle de la couronne que l'on devrait alors pouvoir observer dans de bonnes conditions.

L'Observatoire du Pic du Midi présente, pour ce genre de recherches, des avantages que l'on ne trouve réunis nulle part ailleurs : son altitude est très élevée (2870 m.), il est éloigné des principaux sommets de la chaîne des Pyrénées et il domine la plaine de 2500 m. environ.

Diffusion par les molécules de l'atmosphère, et par les particules en suspension

La diffusion de Mie est une théorie générale de diffraction de la lumière par des petites particules sphériques.

On connaît mieux son cas limite, la diffusion de Rayleigh, qui explique la couleur bleue du ciel : elle correspond à la diffusion de la lumière par des particules de dimension inférieure au dixième de sa longueur d'onde. C'est le cas pour la diffusion de la lumière visible (longueur d'onde de 4000 à 8000 Å) par les molécules d'azote et d'oxygène de l'atmosphère terrestre (dimension quelques Å).



Figure 2 : À droite, cas général de la diffusion de Mie pour un rayon arrivant de la gauche, et une particule de dimension non négligeable par rapport à la longueur d'onde de la lumière incidente. À gauche, cas limite dit de diffusion Rayleigh pour une particule négligeable par rapport à la longueur d'onde.

La diffusion Rayleigh est quasi-isotrope, comme le montre la figure à gauche. Elle est proportionnelle à l'inverse de λ^4 , où λ est la longueur d'onde : ainsi le bleu, qui a une longueur d'onde d'environ 4000 Å, deux fois inférieure à celle du rouge de 8000 Å, est seize fois plus diffusé par l'atmosphère, d'où la couleur bleue du ciel.

La diffusion de Mie est à l'œuvre lors de la diffraction de la lumière solaire par les gouttes d'eau des nuages. On notera l'intéressante remarque de Lyot pour observer cette diffraction :

Pour nous en rendre compte, choisissons une très belle journée et masquons le Soleil par un écran éloigné, le toit d'une maison, par exemple. Nous constaterons que le ciel, dont la teinte générale est un bleu assez foncé, devient plus blanc et beaucoup plus brillant lorsqu'on s'approche du bord solaire.

Dans ce cas, l'approximation ci-dessus ne s'applique pas. On démontre alors que l'intensité de la diffraction ne dépend pas de la longueur d'onde, ce qui explique la diffusion quasi-uniforme sur le spectre solaire et donc la couleur blanche des nuages.

@@@@@@@

Le principal problème vient de la diffusion instrumentale. Tout le talent d'instrumentaliste de Lyot se déploie ici pour éliminer cette source de lumière parasite. Les lentilles doivent être d'excellente qualité optique, et Lyot s'adresse pour cela à la maison Parra-Mantois, fournisseur habituel des astronomes. Il demande à son collègue Paul Couder, un opticien de talent, de polir ces pièces.

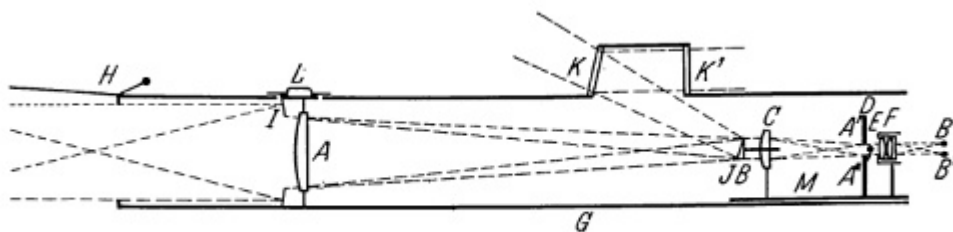


Schéma du coronographe.

Figure 2 de l'article de Lyot : Le coronographe de Lyot. Le disque B en laiton noirci « déborde le Soleil d'une quinzaine de secondes seulement » en diamètre apparent, ce qui permet de "cacher" la lumière du disque solaire. L'idée du disque préexistait bien évidemment : c'est le traitement par Lyot de la diffusion instrumentale qui est l'innovation.

Au lieu d'utiliser un simple écran B pour intercepter la lumière du disque solaire, Lyot utilise un disque argenté J qui renvoie cette source de chaleur vers l'extérieur du tube par deux glaces K et K', la deuxième laissant sortir la lumière réfléchiée par la première.

Un diaphragme concave I et un disque J, également argentés, renvoient à l'extérieur le rayonnement inutilisé, pour ne pas chauffer l'air contenu dans le tube du coronographe ce qui troublerait la netteté des images.

L'innovation décisive de Lyot est un deuxième système d'écrans D et E qui arrêtent la lumière solaire diffractée par les bords de la lentille d'entrée A et celle réfléchie entre les faces de cette même lentille⁵.

Les bords du diaphragme [D] arrêtent la lumière diffractée par les bords de la première lentille [A]. Le petit écran [E] arrête la lumière des images solaires produites par réflexion sur les faces de cette lentille.

En termes modernes, nous dirions que l'écran D réduit la diffraction par la méthode d'apodisation, qui supprime les ailes de la tache de diffraction d'Airy.

Enfin, pour empêcher toute diffusion par les poussières, il enduit de graisse l'intérieur du tube du coronographe, et nettoie régulièrement la lentille A. Pour cela, il projette son haleine sur la pièce, passe un coton en essuyant toujours dans le même sens, passe le coton sur sa peau pour y prélever un soupçon de graisse, frotte à nouveau la lentille, et recommence la procédure jusqu'à obtenir une très mince couche de graisse qui empêchera l'adhésion électrostatique de poussières.

OBSERVATIONS DE LA COURONNE SOLAIRE AVEC LE CORONOGRAPHE

Les protubérances

L'observation des protubérances solaires est possible en dehors des éclipses sans montage coronographique, à condition d'utiliser un filtre étroit, en général centré sur la raie de l'hydrogène ($H\alpha$) à 6563 Å. L'instrument développé à cette fin est le spectrohéliographe. L'avantage du coronographe est de permettre des poses très courtes, pour obtenir des images plus nettes des protubérances qui peuvent évoluer rapidement.

Photosphère, chromosphère et couronne

Le Soleil est traditionnellement décomposé en trois zones, la photosphère, la chromosphère et la couronne, sans oublier le vent solaire qui se propage jusqu'aux confins du système solaire.

1) La photosphère, ou surface visible, est à une température de 5 500 degrés.

5. Lyot développe p.75-76 un paragraphe pédagogique fort intéressant, que nous ne commentons pas ici, sur la diffusion parasite par une lentille (par exemple la lentille A), qu'il résume dans la figure 1 : halo de diffusion sur les bords de la lentille, tache lumineuse en son centre produite par réflexion de la source entre les deux faces de la lentille.

2) La chromosphère⁶ s'étend de la surface à quelques milliers de kilomètres ; la température y est d'environ 10 000 degrés.

3) Au-delà s'étend la couronne, un plasma très ténu et très chaud (de 300 000 à plusieurs millions de degrés).

Les protubérances solaires sont des jets de plasma relativement froid (comme la chromosphère) qui partent de la surface solaire et peuvent s'élever à plusieurs dizaines de milliers de kilomètres, en suivant des lignes de champ magnétique et transportant typiquement 100 milliards de tonnes de gaz.

Plus d'un demi-siècle après les premières mesures de température dans la couronne, le mécanisme de chauffage de la couronne reste encore largement inconnu. Le champ magnétique joue sans doute un rôle important dans le transport d'énergie des régions internes. Dès 1942, le suédois Hannes Alfvén (1908-1995, prix Nobel de physique 1970), proposait un mécanisme reposant sur la génération d'oscillations transverses du plasma magnétisé, baptisées plus tard ondes d'Alfvén. Les recherches actuelles se partagent entre deux possibilités, l'excitation à la surface solaire d'ondes qui vont se dissiper dans la couronne, ou des mouvements lents de la photosphère qui déstabilisent la configuration du champ magnétique, dissipant ainsi de l'énergie magnétique.

L'imagerie directe

Comme l'explique Lyot, la lumière du fond de ciel s'atténue aux grandes longueurs d'ondes, d'où l'intérêt d'observer dans le proche infrarouge. Toutefois, la sensibilité des plaques photographiques est optimale dans le bleu, et s'atténue nettement dans le rouge. L'astuce de Lyot, une fois de plus en avance sur son temps, est d'augmenter la sensibilité par ce que nous appelons le « stacking », en empilant les poses, ce qui se fait maintenant aisément par ordinateur. Le gain en sensibilité est proportionnel à la racine carrée du temps de pose.

Les contrastes des images de la couronne ont été amplifiés par le procédé suivant : les négatifs sont projetés successivement, avec un appareil à agrandissement, sur une plaque à grands contrastes en superposant exactement, à l'aide d'un dispositif approprié, les détails les plus nets.

6. Litt. sphère colorée, due à la couleur rose de la raie H α à 6563 Å.

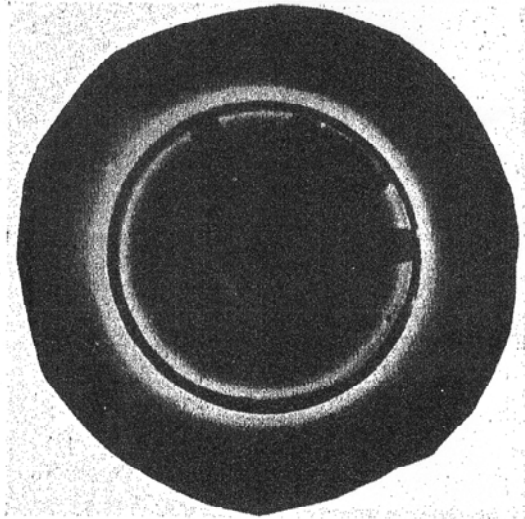


Figure 6 de l'article de Lyot : La couronne solaire photographiée le 21 juillet 1931 à 16 heures (somme de six poses par "stacking"). La couronne est l'anneau extérieur brillant. Comme l'indique Lyot, si on la parcourt dans le sens rétrograde (contraire aux aiguilles d'une montre) depuis le haut, on voit une petite protubérance brillante à l'angle de position 50° . Une autre protubérance s'étend de 80° à 95° et s'élève à plus de 7 minutes d'arc du Soleil. Une protubérance plus étroite et s'élevant moins haut apparaît entre 100° et 135° . Une bande brillante s'étend à droite de 215° à 330° , culminant vers 260° .

La polarimétrie

La lumière de la couronne est polarisée⁷ – parce que sa lumière est diffusée par les électrons de la couronne –, alors que le fond de ciel ne l'est pas, d'où l'intérêt d'observer avec le polarimètre ; Lyot utilisera aussi cette option par la suite pour observer la couronne solaire à l'Observatoire de Meudon.

Au-delà de 7' du bord solaire, la polarisation du ciel était nulle, il en était de même de celle des halos blancs produits par les poussières et les cirrus. La polarisation commençait à apparaître à 6' du bord, elle augmentait rapidement vers le Soleil puis elle restait à peu près constante au-dessous de 3'. Elle se montrait d'autant plus forte que le ciel était plus transparent ; au contraire, le passage de nuages, même légers, la rendait insensible. On peut conclure de ce qui précède que la polarisation trouvée n'est pas d'origine atmosphérique ; l'étude, en laboratoire, du système optique employé a montré qu'elle n'était pas instrumentale. C'est donc bien la polarisation de la couronne que l'on observe ainsi (...).

7. Cette propriété de la couronne est connue depuis le XIX^e siècle, mais pas la nature des particules diffusantes.

Les diagrammes de la figure 7 montrent la proportion de lumière polarisée dans les différentes directions autour du Soleil. Ces diagrammes ressemblent beaucoup à ceux obtenus en lumière totale ou en faisant le «tour de couronne⁸».

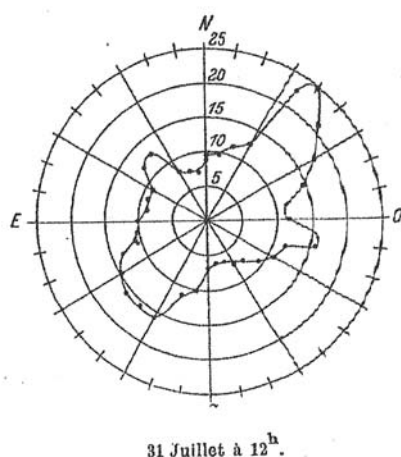


Figure 7dr. de l'article de Lyot : Polarisation de la couronne solaire. Proportion de lumière polarisée, exprimée en millièmes, mesurée à 80'' du bord solaire dans les différents angles. Comme dit Lyot, on constate « deux minima, vers 10° [Est] et 190°, dirigés sensiblement suivant la ligne des pôles du Soleil.

La spectroscopie de la couronne solaire

Plutôt que d'installer son spectrographe sur les rails disponibles à l'extérieur du tube du télescope, Lyot a l'audace d'enlever le barillet dans lequel est monté le miroir du télescope et de mettre son instrument à l'intérieur du tube. La difficulté n'est pas tant de démonter le miroir (qui devait bien peser 50 kg) que de réaligner le système optique après son remontage. Pour la commodité des observateurs, Lyot conçoit un spectrographe modulable, avec des commandes mécaniques à distance pour modifier les montages et réglages difficilement accessibles une fois que l'instrument est en place.

Lyot décrit ses observations des deux raies les plus intenses du spectre de la couronne, encore non identifiées à l'époque, la raie verte à 5303 Å et la raie rouge à 6374 Å.

La moyenne [de la valeur de la longueur d'onde de la "raie verte"], de 5302,85, paraît déterminée avec une précision supérieure à celle que l'on obtient pendant les éclipses.

Le spectre de la couronne contient, dans le rouge, une autre raie parfois assez intense ; sa photographie a nécessité cependant des poses beaucoup plus longues que celles de la raie verte (...) La raie rouge paraît

8. C'est ainsi que les astronomes du Pic du Midi ont baptisé la mesure quotidienne de l'intensité des raies coronales par paliers de dix degrés autour du Soleil dans les années cinquante et soixante.

subir, sur les diverses images, des déformations qui ont diminué la précision des mesures de longueurs d'ondes. Ces mesures, faites à Meudon par M. H. Grenat⁹, sur les quatre meilleurs clichés, ont donné 6374,75 Å.

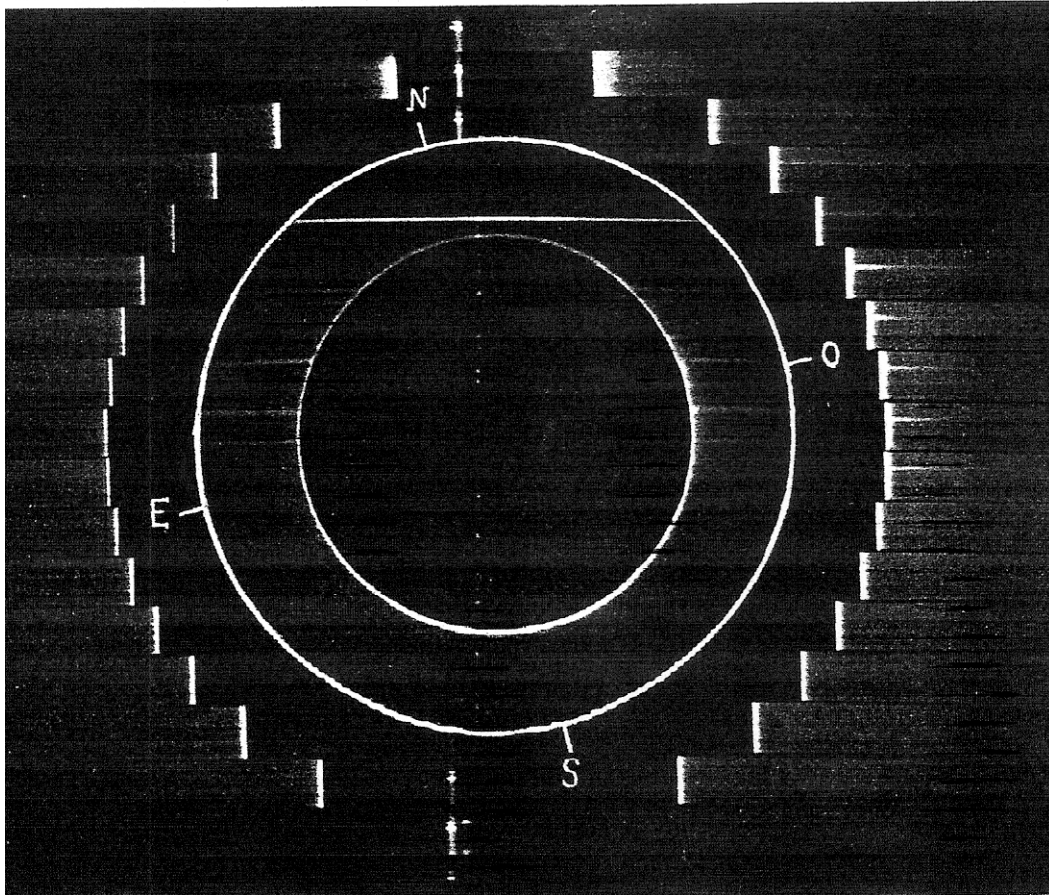


Figure 13 de l'article de Lyot : La "raie verte" observée le long de la couronne solaire le 7 août 1931. Au centre, la couronne, avec comme le dit Lyot « un beau jet à l'Ouest, sur l'équateur » (cf. légère protubérance sur le disque interne, côté Ouest i.e. à droite). À l'extérieur, on voit, côté Ouest, la "raie verte" (c'est la raie horizontale perpendiculaire aux bâtonnets verticaux) : comme le dit Lyot, « Nous retrouvons la raie verte, très forte à l'endroit correspondant au jet de la photo précédente. Elle est très faible sur tout le reste de la couronne ».

Le physicien suédois Bengt Edlén (1906-1993) montrera dix ans plus tard qu'elles sont dues respectivement à une transition du Fe XIV et du Fe X.

L'identification des raies de la couronne solaire

Au XIX^e siècle, on pensait que la couronne solaire, connue par les éclipses, était de nature analogue aux aurores boréales. Une raie verte est en effet présente dans les deux phénomènes ; mais,

9. Henri Grenat (1900-1968) : polytechnicien, astronome à l'Observatoire de Meudon.

comme on s'en rend compte en 1871, il ne s'agit pas de la même raie. La raie coronale, ne correspondant à aucun élément connu, a d'abord été attribuée à un élément nouveau, le « coronium ». Les nombreuses études réalisées à partir de 1911 pour tenter d'identifier les raies brillantes de la couronne solaire restent vaines.

Dans les années 1930, Pol Swings (1906-1983) et Bengt Edlén, universitaires à Liège et Uppsala, arrivent à la conclusion que ces raies doivent être des raies interdites de faible ionisation, parce que les raies permises de tous les éléments atomiques abondants dans l'Univers ont été mesurées en laboratoire. Mais les raies interdites sont très étroites, à moins d'être élargies par effet Doppler¹⁰. Pour produire les largeurs mesurées par Lyot, il faut des températures de l'ordre du million de degrés, ce qui à l'époque est une température inacceptable pour la couronne. Les astrophysiciens ne peuvent pas imaginer des niveaux d'ionisation plus élevés que le troisième niveau, et passent trois ans à étudier les spectres de Fe III.

Une première indication que le niveau d'ionisation peut être plus élevé vient d'une lettre de Walter Grotrian (1890-1954) de l'Observatoire de Potsdam à Edlén en 1937. Il y mentionne que deux des raies détectées par Lyot dans la couronne solaire peuvent correspondre à des transitions calculées par Edlén pour les ions Fe X et Fe XII. Motivé par cette remarque, Edlén détermine en 1939 les longueurs d'onde de raies de transition de niveaux d'ionisation plus élevés de Fe, Ni et d'autres éléments, et trouve un certain nombre de coïncidences avec les raies de la couronne.

Ce n'est qu'en 1943 qu'Edlén publiera l'identification complète des 23 raies de la couronne, ouvrant ainsi un nouveau domaine de recherche sur les plasmas à très haute température.

Ayant mesuré la largeur des raies, Lyot aurait pu estimer une valeur approximative de la température Doppler de la couronne en utilisant l'équation

$$\Delta\lambda = \lambda \times \frac{\sqrt{kT}}{mc^2}$$

où m est la masse de l'atome excité. L'équation exacte contient en outre un terme prenant en compte la turbulence dans la couronne.

Il effectuera le calcul dans un article publié dans *L'Astronomie* en 1937. En supposant qu'il s'agit d'atomes d'oxygène, il trouve une température de 660 000 degrés. Il en conclut à tort :

10. La température d'un milieu est une mesure de l'agitation désordonnée des particules qui le composent. Du fait de leur vitesse aléatoire importante, les ions de la couronne rayonnent à une longueur d'onde légèrement décalée par effet Doppler, et la raie produite par l'ensemble des ions s'en trouve élargie.

Une telle température paraît bien difficile à expliquer et même à concevoir. Il ne s'agit donc pas ici d'un simple phénomène thermique.

Détail révélateur, l'article de Lyot ne comporte que deux renvois bibliographiques, qui sont à ses propres travaux. La raison est simple : il est le premier à pouvoir photographier la couronne solaire pendant des heures. Auparavant, il fallait se contenter des quelques minutes que dure une éclipse !

LE PIC DU MIDI APRES LYOT

Lyot a joué un rôle important dans le développement de l'astronomie au Pic du Midi entre 1930 et 1960. Il a initié les observations du Soleil, tant la couronne (en 1930) que la photosphère (en 1943), et encouragé les observations planétaires. Sa disparition n'a pas marqué la fin d'une ère, bien au contraire. Les astronomes qui travaillaient avec lui ont poursuivi son œuvre, exploitant autant les qualités des instruments et des méthodes qu'il avait mis au point que les qualités intrinsèques du ciel au Pic du Midi.

Si les sondes spatiales ont pris la relève des observations télescopiques dans le domaine planétaire, l'Observatoire du Pic du Midi reste un site unique au monde pour l'observation du Soleil.

