

Les nouveaux coronographes du Pic du Midi : schémas optiques et buts scientifiques

par **Luc DETTWILLER**

Lycée Blaise Pascal - 63037 Clermont-Ferrand Cedex

dettwiller.luc@voila.fr

et **Jacques-Clair NOËNS**

Observatoire du Pic du Midi

Laboratoire d'Astrophysique de l'Observatoire Midi-Pyrénées - 65000 Tarbes

noens@ast.obs-mip.fr

RÉSUMÉ

On présente le nouvel instrument solaire composite CLIMSO, installé récemment au Pic du Midi et entré progressivement en fonction à partir de 2007. La conception des coronographes C1 et C2 de CLIMSO est exposée d'abord quant à son principe, les coronographes étant généralement des systèmes subtils qui combinent plusieurs techniques d'optique instrumentale ; on suit alors la logique de leurs cahiers des charges, la façon de les satisfaire, et les difficultés liées aux indispensables filtres à fenêtre spectrale étroite – qui soulèvent aussi divers problèmes d'optique physique. Enfin, on esquisse les questions d'astrophysique solaire pour l'étude desquelles CLIMSO a été construit.

INTRODUCTION

Les coronographes à grande ouverture et installés dans des sites d'altitude sont peu nombreux au monde : citons celui du Lomnicki Szczyt (2 634 m) en République Slovaque, de Kislovodsk (2 130 m) en Russie, Sac Peak (2 800 m) au Nouveau Mexique, Kitt Peak (2 100 m) en Arizona, Mauna Loa (4 169 m) à Hawaï, Norikura (2 900 m) au Japon⁽¹⁾... et du Pic du Midi de Bigorre (2 877 m) en France. On entrevoit dès lors tout l'intérêt que présente l'installation récente, au Pic du Midi, du nouvel instrument solaire composite CLIMSO (cf. figure 1, page ci-après), inauguré le 9 septembre 2007, formé de deux coronographes C1 et C2 et deux lunettes solaires L1 et L2 qui fonctionnent simultanément comme spectrohéliographes [1-2].

CLIMSO donne des images composites (cf. figure 2, page ci-après) formées de la juxtaposition d'une image de la couronne avec une image du disque solaire. Une image de

(1) Il y a encore ceux de Wendelstein (1 840 m) en Allemagne, Arosa (2 050 m) en Suisse, Kanzelhöhe (1 900 m) en Autriche, Climax (3 600 m) au Colorado ; mais ils sont aujourd'hui probablement tous arrêtés. Par ordre d'apparition, le coronographe d'Arosa est le second au monde, suivant de dix ans le premier (voir § 1).

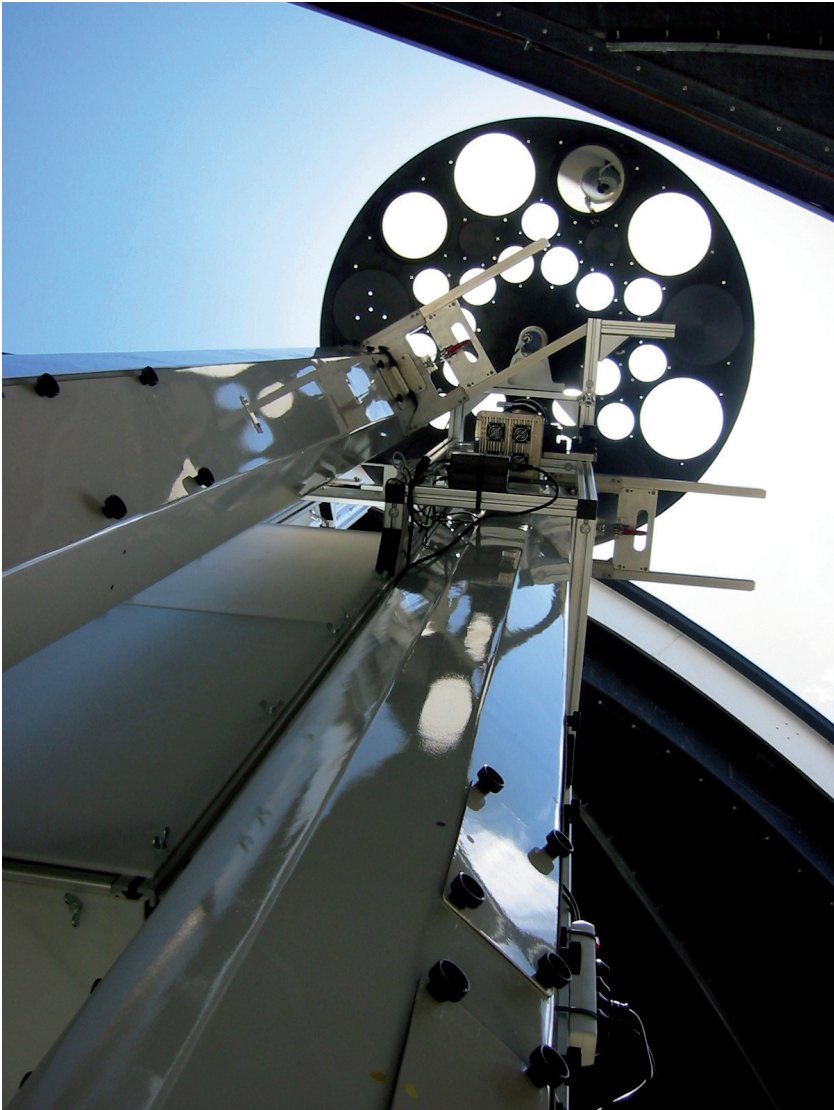


Figure 1 : Le nouvel instrument solaire CLIMSO, bien reconnaissable avec sa grande roue à diaphragmes robotisée – comportant des densités optiques pour les calibrations, des verres dépolis, des groupes de quatre petits trous pour le pointage, et de grandes ouvertures pour l’observation avec les coronographes. Les ouvertures moyennes et plus proches du centre sont pour les lunettes ; l’arrière de la caméra de l’une d’elles est visible au milieu de la photo. Les plaques tenues par des grosses vis noires recouvrent des trappes de visite des principaux éléments optiques des deux coronographes ; elles sont fermées en régime normal pour limiter les possibilités d’entrée de lumière parasite, et de poussières – provoquant de la diffusion.

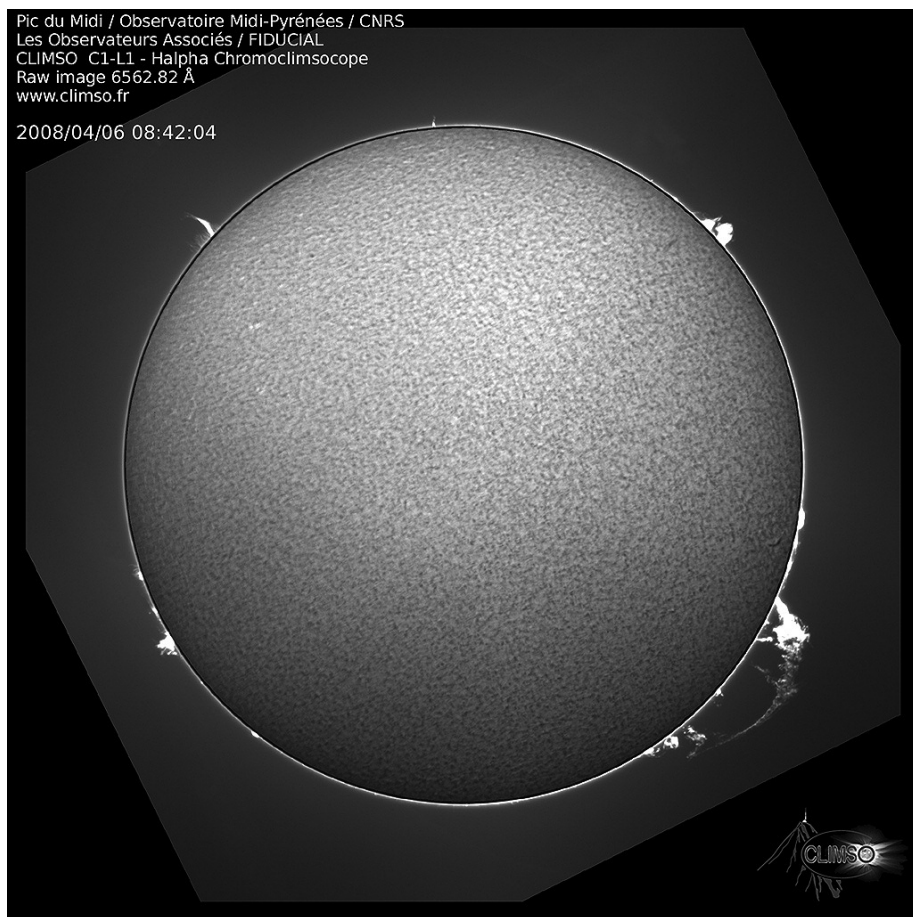


Figure 2 : Une image fournie par CLIMSO dans la raie H α , en absorption pour la chromosphère (vue sur le disque avec un filtre de 0,06 nm de bande passante) et en émission pour la couronne (avec un filtre de 0,25 nm de bande passante car la couronne est plus chaude que la chromosphère) ; noter le contraste surprenant entre le calme du disque et l'activité de la couronne.

la couronne est formée par C1 avec la seule raie C (dite H α) à la longueur d'onde de 656,3 nm dans le rouge, une autre par C2 dans le domaine infrarouge (avec une raie soit de la famille He I – celle de l'atome neutre dans les notations spectroscopiques – à 1 083,0 nm, soit de la famille Fe XIII à 1 074,7 ou bien 1 079,8 nm, soit du continuum à 1 077,0 nm). Une image du disque est formée par L1 dans la raie H α , une autre par L2 dans la raie K de Ca II à 393,4 nm. On rappellera au paragraphe 4 l'intérêt d'observer le disque solaire dans des bandes spectrales étroites situées dans ces raies ; il est connu depuis la réalisation des premiers spectrohéliographes dans les années 1890 par DESLANDRES en

France et HALE aux États-Unis (qui vers 1926 l'adapta en spectrohélioscope, rendu ensuite plus lumineux par le filtre de LYOT).

Les lunettes L1 et L2 sont des *Coronado SolarMax 90*, munies d'un filtre interférentiel de 0,06 nm de bande passante centré sur la raie C (pour L1) ou de 0,21 nm sur la raie K (pour L2). Ces appareils étant du commerce, nous nous contentons ici de renvoyer les lecteurs aux notices des revendeurs [3] que nous ne détaillerons pas. Mais nous présenterons plus spécifiquement les coronographes C1 et C2 : travaillant dans des raies intéressantes pour l'astrophysique et choisies par Jacques-Clair NOËNS, étudiées optiquement et calculés par Luc DETTWILLER, ils ont été montés avec l'équipe des Observateurs Associés grâce au soutien de Christian LATOUCHE – PDG de Fiducial, mécène de cette équipe et dont le financement a intégralement couvert la fabrication de CLIMSO (acronyme signifiant Christian LATOUCHE IMageur SOLaire).

D'abord nous rappellerons les principes énoncés par Bernard LYOT (1897-1952) concernant les coronographes à occultation interne. Puis nous exposerons une partie du cahier des charges de CLIMSO, en insistant sur une des caractéristiques photométriques de l'image qui a été recherchée pour cet instrument – par rapport au coronographe HACO dont il prend la relève. Ensuite, nous donnerons quelques indications sur les filtres utilisés dans CLIMSO, leurs qualités et leurs exigences de réglage ; alors nous verrons que celles-ci créent une difficulté propre aux coronographes. Enfin, nous expliquerons le caractère novateur de cet instrument et son apport escompté en astronomie solaire.

1. PRINCIPES DE LYOT POUR LES CORONOGRAPHES À OCCULTATION INTERNE

Les coronographes sont des instruments dérivés des lunettes ou des télescopes et spécifiquement destinés à former une image de la couronne solaire ; d'ailleurs sans eux, celle-ci n'est visible depuis le sol qu'au moment des éclipses de soleil. En effet, sur le récepteur d'images, avec la lumière qui provient directement du disque solaire (lumière dite « d'ordre zéro ») dont la luminance est environ cent fois celle des protubérances (un million de fois pour la « couronne blanche »⁽²⁾ visible lors des éclipses), il se produit une sorte d'« éblouissement ». Ce phénomène peut être supprimé par la mise en place, à l'intérieur de l'instrument, d'un occulteur (cf. figure 3) sur une image intermédiaire accessible du disque solaire, afin d'empêcher la lumière d'ordre zéro d'atteindre le récepteur.

Mais l'ajout d'un occulteur dans une lunette ne suffit pas à rendre visible la couronne ([4], p. 214-216) ! Il y a deux raisons à cela :

- ◆ la lumière parasite – due aux réflexions parasites, à la diffusion et à la diffraction de la lumière du disque solaire à l'intérieur de l'instrument – est plus importante que la lumière formant l'image normale de la couronne ;
- ◆ la lumière diffusée dans l'atmosphère, responsable du bleu du ciel et appelée aussi « fond de ciel » ou « lumière de l'air », masque la lumière envoyée par la couronne.

(2) dite aussi « couronne K » car son spectre est un Kontinuum (en allemand).

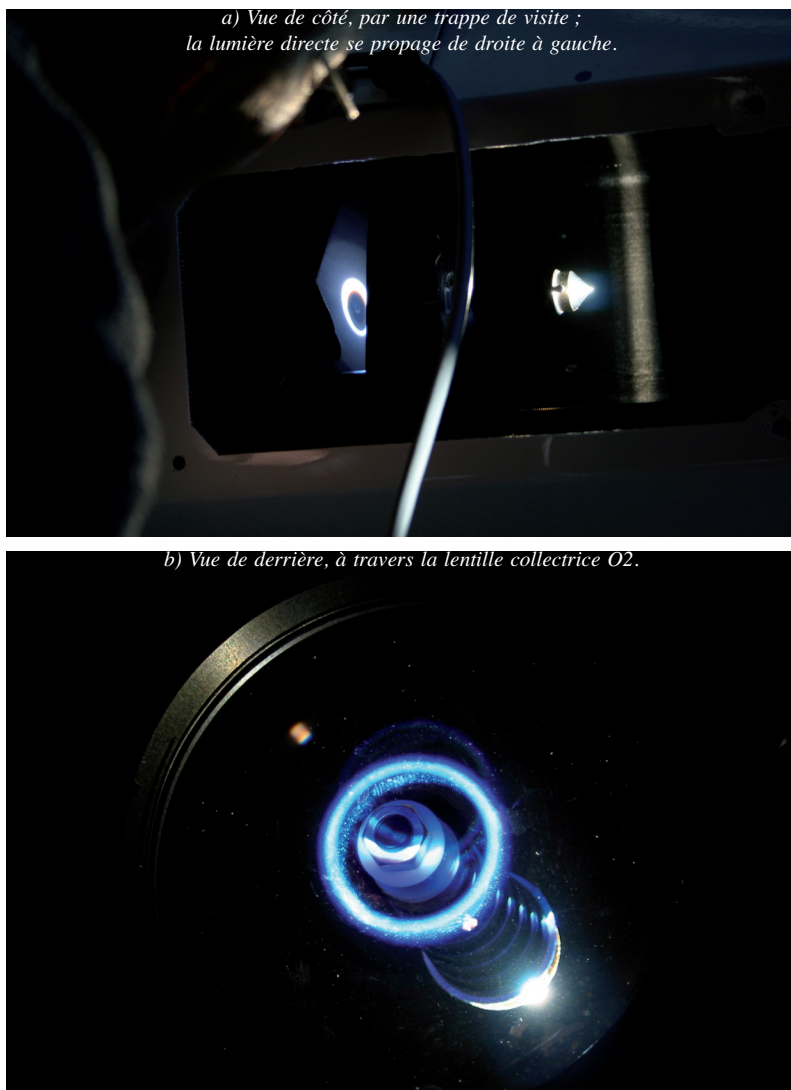


Figure 3 : Occulteur, qui empêche partiellement la lumière directe du disque solaire d’atteindre le récepteur d’image : la composante rouge $H\alpha$ qui serait transmise par le filtre de C1 est entièrement reçue par le disque occulteur qui la bloque (ou le cône occulteur qui la réfléchit vers l’intérieur d’un cylindre absorbant afin de répartir les problèmes liés à l’échauffement, comme les turbulences) ; la lumière directe du bord interne du disque solaire qui dépasse l’occulteur sera bloquée par le filtre – c’est dans C1 la composante non rouge telle que la défocalisation, par rapport au disque occulteur, de l’image du disque solaire soit assez forte (elle est due à l’aberration chromatique normale de l’objectif simple O1), ce qui explique la couleur bleue de l’anneau lumineux visualisé sur O2 dans la figure 3b.

Ce dernier phénomène est plus difficile à combattre, à moins d'envoyer le coronographe dans l'espace, comme par exemple avec les missions SOLWIND⁽³⁾ (1979-1985), SOHO⁽⁴⁾ (depuis 1996) ou STEREO⁽⁵⁾ (depuis 2006), etc. En ce qui concerne la lumière parasite, les travaux de Bernard LYOT en 1930, puis ceux de John W. EVANS, ont consisté à en rechercher les sources à l'intérieur de l'instrument, et à atténuer cette lumière ; cela permet de concevoir deux types de coronographes, ceux à occultation interne (LYOT) et ceux à occultation externe (LYOT et EVANS).

D'après LYOT, dans une lunette astronomique la lumière parasite a pour origine :

- ◆ la diffraction par le diaphragme D1 de l'objectif O1 ou par son bord – on pourra bloquer cette lumière diffractée grâce au « **diaphragme de LYOT** » DL (cf. figures 4 et 5) ;
- ◆ les réflexions multiples à l'intérieur de O1, qui donnent naissance à des images finales du disque solaire très défocalisées – on pourra encore diminuer cette lumière réfléchie grâce à la « **tache (ou pastille) de LYOT** » TL (cf. figures 4 et 5) ;

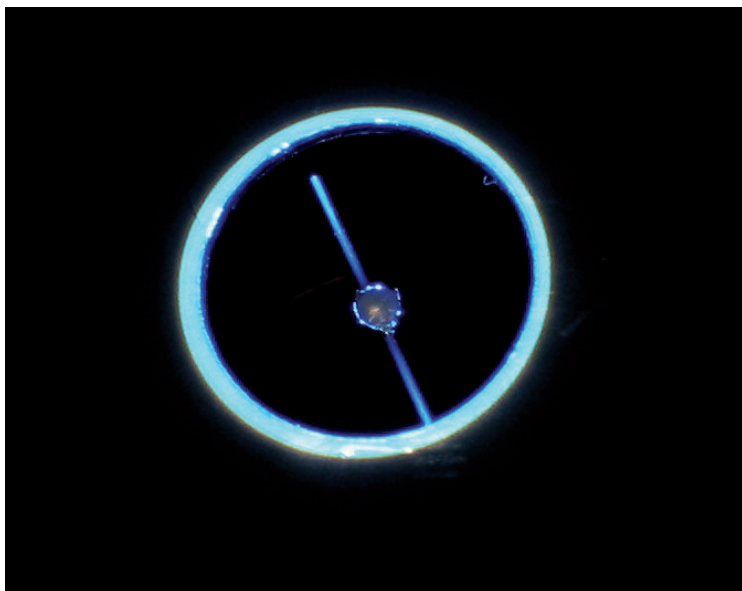


Figure 4 : Diaphragme et pastille de LYOT ; conformément aux explications de la figure 3, leur rôle ne consiste pas à bloquer la lumière directe du disque solaire (ou d'ordre zéro) bleu-violet qui les éclaire surtout, mais la lumière parasite de premier ordre (plus discrète ici) – *i.e.* d'une part celle qui est diffractée surtout par le diaphragme D1 de l'objectif puis rassemblée par O2 sur le bord du diaphragme de LYOT DL qui la bloque, d'autre part celle qui effectue par réflexion partielle un aller-retour à l'intérieur de O1 puis est rassemblée sur la pastille de LYOT TL (tenue derrière le centre de DL par deux fines tiges).

(3) Acronyme signifiant *SOLar WIND*.

(4) Acronyme signifiant *SOLar and Heliospheric Observatory*.

(5) Acronyme signifiant *SOLar TERrestrial RELations Observatory*.

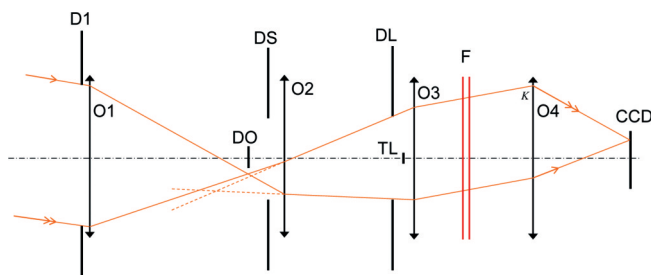


Figure 5 : Faisceau de rayons issu d'un point de la couronne à 21' du centre du Soleil (cf. paragraphe 2.1.), puis cheminant dans un coronographe à occultation interne, dont l'axe optique est orienté en direction du centre du Soleil.

- ◆ la diffusion dans la masse du verre de O1, ou par ses défauts d'homogénéité (fils, feuillets, bulles, pierres) – on utilisera alors des verres très clairs et soigneusement sélectionnés grâce à la technique d'observation en contraste de phase⁽⁶⁾ par exemple ;
- ◆ la diffusion par les défauts des surfaces de O1 (poussières, micromamelonnage, rayures, piqûres) – on polira donc ces surfaces optiques avec le plus grand soin, et on enfermera l'instrument dans une enceinte qui le mettra à l'abri des poussières.

La « lumière parasite de *premier ordre* » est celle engendrée, à partir de la lumière d'ordre zéro, surtout par une diffraction *simple* au niveau du diaphragme D1 de O1, ou un aller-retour dans O1 [5]. Comme la luminance du faisceau engendré par cet aller-retour est environ celle de la lumière d'ordre zéro multipliée par R^2 (où $R \cong 0,04$ est le facteur de réflexion verre-air dans O1), elle est encore plus forte que la luminance de la couronne ! Il est donc impératif de bloquer cette lumière parasite de premier ordre.

En ce qui concerne le coronographe de LYOT, à occultation interne, son principe de base est celui d'une lunette astronomique, mais avec quelques modifications (cf. figure 5) destinées à supprimer toute la lumière d'ordre zéro et l'essentiel de la lumière parasite de premier ordre.

D'abord son objectif O1 n'est pas un doublet achromatique, mais seulement une lentille plan-convexe, de façon à minimiser les possibilités d'aller-retour dans l'objectif, ainsi que la diffusion par les surfaces optiques et par le baume qui les colle. Évidemment, son chromatisme imposera de ne lui donner qu'une faible ouverture relative (13 cm de diamètre sur 315 cm de focale pour le premier coronographe mondial, celui de LYOT au Pic du Midi dès 1931) et de n'observer que dans une fenêtre spectrale assez étroite ; cependant, pour minimiser l'aberration sphérique, sa face convexe est tournée vers le soleil.

(6) Méthode inventée en 1930 par Frederik ZERNIKE, redécouverte et améliorée par LYOT vers 1946. Celui-ci est mort prématurément au Caire, d'une attaque cardiaque au retour de la campagne d'observation d'une éclipse solaire au Soudan en 1952 – l'année précédant la remise du prix Nobel à ZERNIKE pour cette méthode. La variante de LYOT permet de visualiser des défauts de surface de 0,1 nm de hauteur avec un contraste de 0,15 !

Sur l'image réelle du disque solaire fournie par O1 à l'intérieur du coronographe, on place un occulteur DO (cf. figures 3 et 5, pages précédentes), qui déborde l'image de quelques centièmes. Ainsi – en ce qui concerne les composantes spectrales transmises par le filtre – la lumière d'ordre zéro est bloquée le plus tôt possible, et après DO il ne peut plus se former de lumière d'ordre 1 ; il reste maintenant à atténuer la lumière d'ordre 1 formée avant DO.

Juste derrière DO, une lentille collectrice (ou « de champ ») O2 a pour rôle la formation d'une image réelle du diaphragme D1 de O1, afin de pouvoir placer sur celle-ci le diaphragme de LYOT DL (cf. figures 4-5) pour recevoir l'image du bord de D1 qui diffracte la lumière. Ainsi, au sens de l'étude de la lumière parasite dans l'instrument, le verre de O1 reste le seul *élément critique* – i.e. le seul qui soit éclairé par une source importante de lumière et qui puisse en renvoyer par sa diffusion simple vers le récepteur d'image.

Peu après DL, on met la tache de LYOT TL centrée sur l'axe (cf. figures 4 et 5) : elle bloque la lumière de la petite image parasite réelle du disque solaire, formée avec un aller-retour de la lumière dans O1 (qui se comporte alors comme une lentille nettement plus convergente) puis une traversée de O2.

Enfin, des doublets O3 et O4 (cf. figure 5) forment l'image finale de la couronne solaire sur le récepteur. Dans ce coronographe, le diaphragme de LYOT DL est donc le diaphragme d'ouverture, affecté d'une petite obstruction centrale à cause de la tache de LYOT TL.

Le filtre F (déjà évoqué ci-dessus) permet d'atténuer la lumière du ciel qui masque la lumière coronale, en limitant l'observation à une fenêtre spectrale étroite qui contient une raie d'émission coronale où la luminance spectrale de la couronne est plus grande que celle du ciel (dont le spectre est quasiment continu). En outre, ceci neutralise le problème posé par le chromatisme de l'instrument, et surtout de O1. Sur le plan astrophysique, cette restriction comporte l'avantage de permettre d'observer sélectivement certains constituants de la couronne ; et cet avantage est redoublé si, avec un instrument comme CLIMSO, on peut changer de raie – nous préciserons ce point au paragraphe 4.

D'autres améliorations peuvent être apportées, notamment par l'usage de coronographes à miroirs, ou à occultation externe, dans l'espace ([4], p. 217-219). Mais nous allons maintenant nous intéresser plus spécifiquement à la conception de CLIMSO et donc à ses améliorations par rapport à son prédécesseur, HACO, au Pic du Midi.

2. CAHIER DES CHARGES ET CONCEPTION DES CORONOGRAPHES DE CLIMSO

2.1. Zone imagée, nombre de pixels du récepteur et résolution intrinsèque dans l'objet

On veut obtenir une image du limbe entier du Soleil et de sa basse couronne, donc le diamètre angulaire de l'objet dépasse forcément le double du rayon angulaire ρ_s du

disque solaire, avec $\rho_s \cong 16'$. Plus précisément, l'histogramme des protubérances montre que la plupart d'entre elles ne dépassent pas une distance apparente au centre O du Soleil valant $1,1 \rho_s$; c'est pourquoi nous nous sommes limités en champ à une image de rayon angulaire $1,3 \rho_s \cong 21'$.

Le nombre de pixels du capteur CCD que nous utilisons est limité à 2048×2048 pour des raisons de prix; donc la limite de résolution angulaire due au récepteur est au mieux $\varepsilon \cong 2 \times 1,3 \rho_s / 2048 \cong 1,2''$, si on calcule la taille de l'image voulue de façon que sa dimension soit la plus grande possible (c'est-à-dire la largeur du récepteur CCD). Cela suffit compte tenu de la limite usuellement imposée par les turbulences de l'air.

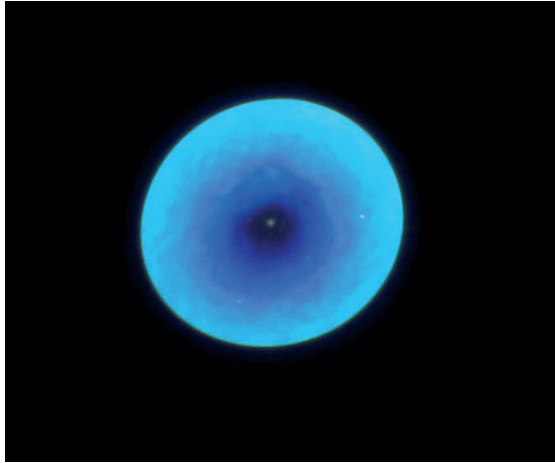
2.2. Choix de l'objectif

Afin d'adapter l'optique de l'instrument à cette résolution, il a fallu choisir le diamètre D de la pupille d'entrée de façon que le rayon angulaire $1,22 \lambda/D$ du disque d'Airy⁽⁷⁾ soit égal à ε , pour la longueur d'onde utilisée λ ; comme ce sera celle de la raie $H\alpha$ pour C1, il faut donc $D \cong 1,22 \lambda/\varepsilon \cong 136 \text{ mm}$. Or la pupille d'entrée est l'antécédent (situé tout près de $O1$ dans l'espace objet) du diaphragme de LYOT; donc le diamètre de $O1$ devra être légèrement supérieur à D . Mais pour avoir un éclairage image plus important (la dimension de l'image étant imposée par le capteur CCD de $15,15 \text{ mm} \times 15,15 \text{ mm}$) afin d'observer de faibles protubérances, on a opté pour un objectif de 18 cm de diamètre (contre 15 cm pour celui de HACO, pour lequel $D \cong 12,5 \text{ cm}$).

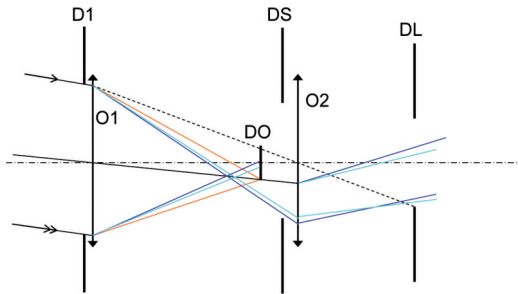
Comme le rayon du disque occulteur est $f'_1 \rho_s$ où f'_1 désigne la focale de $O1$, et où ρ_s doit être exprimé en radians ($\rho_s \cong 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$), pour une focale de 1 m cela donne $f'_1 \rho_s \cong 4,7 \text{ mm}$; cette valeur est un peu faible pour permettre une manipulation aisée, et les inévitables petites saletés qui peuvent se déposer sur la circonférence de ce disque risquent d'être trop visibles au niveau de l'image du limbe coronal. C'est pourquoi la focale de l'objectif retenu est voisine de $2,5 \text{ m}$.

On a fait fabriquer une trentaine de disques occulteurs, dont les diamètres diffèrent de cinq centièmes de millimètre, et qui sont utilisés aux différents moments de l'année pour tenir compte des variations de ρ_s , à cause de l'excentricité $e \cong 0,017$ de l'orbite terrestre; le plus grand de ces disques est utilisé aux alentours du 3 janvier, date de passage de la Terre à son périhélie. Pour limiter l'échauffement de ces disques, on glisse entre eux et le cône occulteur une rondelle d'un matériau réfractaire: du mica.

(7) Le Royal Astronomer George Biddell AIRY a étudié dès 1835 la diffraction de FRAUNHOFER par une ouverture circulaire.



a) Section du faisceau lumineux par un papier blanc provisoirement placé dans le plan du diaphragme de LYOT DL ; lorsque le coronographe est parfaitement réglé et orienté, cette figure est mouvante, à cause des turbulences qui y produisent par ombroscopie des fluctuations de couleur et d'éclairement – facilement visibles à l'œil nu, mais moins sur cette photographie où on les devine seulement.



b) Schéma où les aberrations chromatiques de O1 et O2 sont exagérées, pour montrer les chemins des différentes composantes spectrales du faisceau venant du point « haut » du disque solaire. D'après l'optique géométrique, les composantes non rouges de ce faisceau provenant de la moitié supérieure de O1 ne sont pas interceptées par le disque occulteur à cause de la défocalisation due à l'aberration chromatique de O1 ; mais à cause de la diffraction par le bord de O1, dans le plan de DL l'atténuation des rayons provenant du centre de O1 décroît progressivement (comme lors d'un focautage [6-8]) en fonction de la défocalisation – qui est d'autant plus forte que leur longueur d'onde est éloignée de celle du rouge. En outre, l'aberration chromatique de O2 fait que les composantes violettes de ce faisceau éclairent DL très légèrement plus « haut » que les composantes bleues sur ce schéma. Ces deux facteurs (surtout le premier qui est prépondérant) expliquent la gradation de couleur observée en a).

Figure 6 : Éclairement dans le plan de DL de C1 quand l'axe du coronographe est orienté vers le centre du Soleil ; conformément aux explications des figures 3 et 4, la lumière d'ordre zéro qui éclaire DL ne peut être que celle du bord interne du disque solaire – et plus ses composantes spectrales sont éloignées du rouge, plus l'aberration chromatique de O1 et la diffraction par D1 permettent à cette lumière d'éclairer le centre de DL.

Un calcul d'optimisation de l'image globale de la couronne (donc en dehors de l'axe du système orienté vers le centre du Soleil) et du coût de la lentille simple O1 nous a conduits à choisir pour elle une face antérieure asphérique, et une face postérieure plane. La meilleure quadrique de révolution pour la première face est un ellipsoïde oblong ; alors l'aberration géométrique entachant l'image d'un point de la basse couronne hors d'axe (presque uniquement une coma du troisième ordre) est très réduite, tellement que l'élargissement qui en résulte pour l'image d'un tel point (en valeur quadratique moyenne) est inférieur au diamètre du disque d'Airy !

2.3. Dimension des pixels et focale résolvante de l'instrument

En valeur absolue, la focale $|f'|$ de l'instrument entier détermine maintenant la largeur $1,22 \lambda |f'|/D \cong \varepsilon |f'|$ de la tache d'Airy dans l'image finale. L'adaptation de l'optique au capteur CCD exige que la dimension p de ses pixels soit égale (ou légèrement supérieure compte tenu des aberrations résiduelles) à cette largeur ; cette contrainte impose que $|f'|$ soit égale (ou légèrement inférieure) à la focale résolvante p/ε .

Dans le commerce il existe couramment deux valeurs de p : $9 \mu\text{m}$ ou $14 \mu\text{m}$, correspondant respectivement aux focales résolvantes $1,5 \text{ m}$ et $2,4 \text{ m}$ pour $D \cong 13,6 \text{ cm}$. Sans nuire à la sensibilité globale de l'instrument, il est plus facile de limiter l'encombrement avec une valeur de p plus petite. Alors, nous avons pris un capteur CCD tel que $p \cong 7,4 \mu\text{m}$ d'où une focale résolvante de $1,23 \text{ m}$ pour $D \cong 13,6 \text{ cm}$; c'est aussi la valeur de $|f'|$ qui donne un champ angulaire de $2 \times 1,3 \rho_s$ sur la largeur du capteur CCD valant $2048 \times 7,4 \mu\text{m} \cong 15,15 \text{ mm}$. Pour la raie $\text{H}\alpha$ utilisée dans C1, la mesure de la focale de C1 par deux méthodes différentes a donné $f' \cong -1247 \pm 1 \text{ mm}$, donc $|f'|$ est bien légèrement inférieur à la focale résolvante pour la valeur réelle de D qui est proche de 16 cm (un peu plus petite que le diamètre de O1).

2.4. Conjugaisons propres au coronographe

On sait que pour bloquer la majeure partie de la lumière parasite de premier ordre, on doit former par O2 l'image réelle de D1 sur DL (*cf.* figure 6, page ci-contre), et une image parasite du disque solaire sur TL ; puis on doit aussi utiliser un filtre. Tout ceci a sur le calcul du coronographe une influence que nous allons discuter maintenant.

2.4.1. Discussion sur O2 quant à l'imagerie solaire

Afin d'éviter une limitation du champ image par le support du cône et du disque occulteur, ceux-ci sont tenus par une tige fixée au centre de O2 (*cf.* figure 7, page ci-après). Mais pour éviter des flexions nuisibles de cette tige, on a limité à une dizaine de centimètres la distance l entre le disque occulteur et O2 ; la petitesse de l fait que le gran-

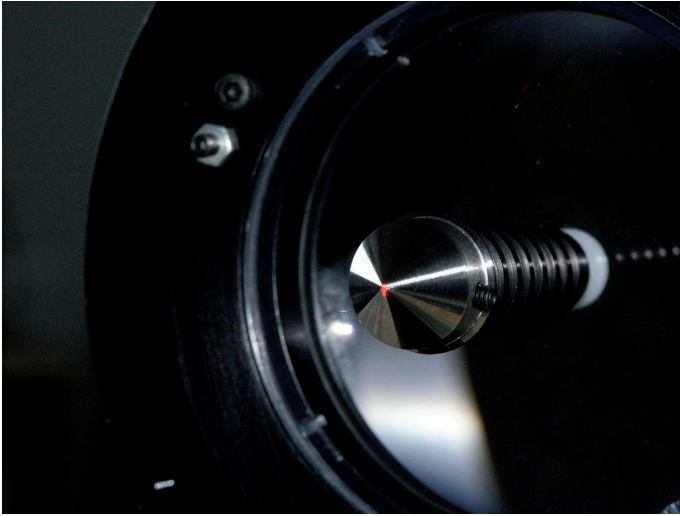


Figure 7 : Cône occulteur (avec sa vis de blocage provisoirement desserrée à droite), porté par son support qui est profilé pour ne pas être atteint par les rayons de la lumière d'ordre zéro non arrêtée par le filtre (cf. figure 3b) – et fixé au centre de O2. La tache rouge au sommet du cône est celle du laser utilisé lors du montage pour centrer les éléments du coronographe.

dissement γ_2 produit pour l'image de la couronne par O2 est assez proche de 1, et O2 se comporte quasiment comme une lentille collectrice. Dans ce cas, elle introduit moins d'aberrations dans l'image de la couronne (quasiment pas de coma ni d'astigmatisme), et on a pu se contenter d'une lentille simple récupérée sur un ancien coronographe.

2.4.2. Gestion des aberrations de l'imagerie pupillaire avec O2

Par contre, l'image rouge de D1 que O2 est censé former sur DL s'avère entachée d'une aberration sphérique notable ! Pour limiter le flux de lumière diffractée, parasite de premier ordre, à qui cette aberration d'ouverture évite d'être bloquée par D1, Luc DETTWILLER a montré l'intérêt d'ajouter entre l'occulteur et O2 un diaphragme à iris DS (cf. figures 5 et 6b), dont on règle le diamètre à volonté : suffisamment grand pour laisser un champ de pleine lumière (pour sa définition, voir [4] p. 87) de rayon angulaire supérieur à $1,3 \rho_s$, suffisamment petit pour cacher les parties marginales de O2 responsables de l'essentiel de son aberration sphérique.

2.4.3. Positionnement de la tache de Lyot

Pour savoir où placer TL, il faut connaître la focale f_1'' de la lentille équivalente à O1, mais à l'intérieur de laquelle la lumière fait un aller-retour par double réflexion partielle.

En assimilant O1 à une lentille mince de centre optique S et d'indice n , et en appelant C_1 et C_2 les centres de courbure respectifs de ses faces antérieure et postérieure, on montre facilement que $\frac{1}{f'_1} = (n-1) \left(\frac{1}{SC_1} - \frac{1}{SC_2} \right)$ tandis que

$$\frac{1}{f''_1} = (n-1) \left(\frac{1}{SC_1} - \frac{1}{SC_2} \right) + 2n \left(\frac{1}{SC_1} - \frac{1}{SC_2} \right),$$

donc $f''_1 = \frac{n-1}{3n-1} f'_1$. La première image fantôme est donc située à la distance f''_1 derrière S ; comme $n \cong 1,514$ pour la raie $H\alpha$, $f''_1 \cong 0,145 f'_1$ est assez petit par rapport à f'_1 pour que l'image par O2 de cette première image fantôme se forme quelques millimètres après DL, donc on a la place de mettre TL avant O3 et on peut facilement l'accrocher à DL (cf. figure 4).

2.4.4. Importance du groupe de lentilles O3

La nécessité d'utiliser un filtre à fenêtre (spectrale transmise) étroite pousse à choisir un filtre interférentiel ou un filtre de LYOT. Or leur fenêtre varie avec l'incidence sur le filtre (voir le paragraphe 3.1.) ; afin d'éviter un élargissement spectral dû à cette variation, pour tout point de la couronne, on souhaite que le faisceau lumineux envoyé par ce point sur le filtre F soit collimaté. De plus, la seule façon d'éviter l'aberration sphérique due aux lames à faces parallèles de F (ainsi que les dédoublements d'images et l'astigmatisme si ces lames sont biréfringentes comme pour le filtre de LYOT) est de mettre à l'infini l'objet pour F. Ainsi doit-on placer un troisième groupe de lentilles O3, de focale f'_3 , tel que l'ensemble $\{O1, O2, O3\}$ forme un système afocal ; son grandissement angulaire s'écrit alors $G = -f'_1 \gamma_2 / f'_3$. Comme l'occulteur sera proche du plan focal objet de O3 et que O3 devra être situé après l'occulteur, on choisira pour O3 un groupe convergent.

2.5. Formation de l'image finale

Un dernier groupe convergent O4 (de focale f'_4) devra donc former l'image finale réelle de la couronne sur le capteur CCD mis dans son plan focal image ; la focale de l'instrument entier sera donc $f' = G f'_4 = -f'_4 f'_1 \gamma_2 / f'_3$. Pour des raisons de coût, on a restreint le choix de O3 et O4 à des doublets du commerce ; le calcul d'optimisation des aberrations de l'image finale, tout en veillant à garder $|f'|$ proche de la focale résolvente 1,2 m, nous a fait prendre des doublets ayant $f'_3 \cong 50$ cm et $f'_4 \cong 20$ cm. Notre étude globale des aberrations géométriques a tenu compte aussi de l'épaisseur des lentilles, dont O2 ; bien sûr, le sens de montage de O3 et O4 dans le coronographe a une influence négligeable sur ses propriétés paraxiales, mais énorme sur les aberrations de l'image finale de

la couronne : il fallait y veiller ! L'une des missions (réussie) de CLIMSO était d'obtenir des images plus résolvantes et avec moins d'aberrations que le coronographe HACO qui précédait CLIMSO sur la même monture équatoriale (montrée par la photo de couverture).

2.6. Positionnement du filtre et calcul du champ de pleine lumière

Comme on l'a expliqué au paragraphe 2.4., le filtre F doit être placé entre O3 et O4. Mais si le diamètre de F était trop petit, ou si l'espacement entre O3 et O4 était trop grand, pour un faisceau provenant d'un point de la couronne situé à $1,3 \rho_s$ du centre du Soleil le point *K* (cf. figure 5) sortirait de O4 ; il y aurait alors un vignettage faisant que le rayon angulaire du champ de pleine lumière serait inférieur à $1,3 \rho_s$. HACO souffrait d'un tel défaut ; avec lui, il était donc compliqué de comparer les luminances de protubérances dont les images se formaient à des hauteurs différentes dans le champ de contour (pour sa définition, voir [4] p. 87), et pour y parvenir il fallait effectuer des poses sur un objet à luminance uniforme. Cela explique une des caractéristiques voulues pour CLIMSO : présenter un champ de pleine lumière de rayon angulaire supérieur à $1,3 \rho_s$; à cette fin, nous avons choisi les diamètres et les positions de O3, F et O4 de façon que ces éléments ne limitent pas le faisceau lumineux représenté sur la figure 5.

3. PROBLÈMES LIÉS À L'UTILISATION DE FILTRES INTERFÉRENTIELS

3.1. Influence de la température

Les filtres interférentiels que nous avons choisis sont ceux de *BARR Associates, Inc.*, onéreux (environ 8 000 \$ pièce) mais réputés pour leur très faible dérive (positive) en longueur d'onde avec la température – inférieure à $0,004 \text{ nm} \cdot \text{K}^{-1}$. En effet, la fenêtre transmise par un filtre interférentiel dépend de l'écart entre ses faces parallèles fortement réfléchissantes, qui peut varier avec la température par dilatation. Par exemple, la dérive des filtres *ORIEL* est $0,01 \text{ nm} \cdot \text{K}^{-1}$; il suffit donc d'une variation de température de 20°C pour que la fenêtre transmise par le filtre de C1 se soit décalée de sa bande passante qui vaut $0,2 \text{ nm}$, ce qui n'est pas compatible avec une utilisation été comme hiver sous une coupole ouverte à près de $2\,900 \text{ m}$ d'altitude.

3.2. Inhomogénéité spectrale sur l'image

Rappelons un corollaire de la variation de la fenêtre en fonction de l'incidence (voir paragraphe 2.4.4.) : avec un système optique centré dont l'axe est dirigé vers le centre *O* du Soleil, la fenêtre spectrale dans laquelle sont observés les différents points de la couronne dépend de leur distance angulaire à *O*. En effet, la longueur d'onde centrale λ de la fenêtre d'un filtre interférentiel dépend de l'angle d'incidence *i* sur lui. Lorsque l'ordre d'interférences utilisé est assez élevé (les filtres *Coronado Ha* travaillent dans l'ordre

643), les déphasages à la réflexion sur les lames formant le filtre sont négligeables, et la variation de λ avec i est quasi proportionnelle à celle de $\cos i$. Quand l'angle d'incidence varie de $i = 0$ à δi , cette longueur d'onde centrale varie de λ à $\lambda + \delta\lambda$, telle que

$$\delta\lambda/\lambda \cong \cos \delta i - 1 \cong -(\delta i)^2/2.$$

Supposons que l'instrument soit centré sur le Soleil, et que les rayons venant du centre de celui-ci aient une incidence normale sur le filtre. Alors, le déplacement spectral de la fenêtre du filtre $H\alpha$ ($\lambda \cong 656,3$ nm) entre le centre du disque solaire et son bord ($\delta i = \rho_s \cong 0,0047$ rad) est $\delta\lambda \cong -0,007$ nm, ce qui est un ordre de grandeur plus petit que la bande passante de L1 (0,06 nm), elle-même plus petite que celle de C1.

Dans ce cas, il ne devrait donc pas y avoir d'effet perceptible du déplacement spectral sur l'éclairement de l'image du disque, qui aurait de toute façon la symétrie de révolution autour du centre du disque⁽⁸⁾.

Remarque : comparaison avec l'effet DOPPLER longitudinal dû à la rotation du Soleil

Sachant que la période équatoriale de rotation du Soleil est de vingt-cinq jours, et son rayon équatorial de $695 \cdot 10^3$ km, sa vitesse de rotation équatoriale est quasiment 2,0 km/s, d'où la valeur relative du décalage DOPPLER longitudinal entre points opposés de l'équateur du disque solaire $1,3 \cdot 10^{-5}$, voisine de $1 - \cos \delta i$ avec δi donné ci-dessus : c'est un ordre de grandeur plus petit que la largeur de la raie d'absorption $H\alpha$ par la chromosphère, et la mise en évidence de cet effet DOPPLER est relativement délicate (cf. figure 8) – elle fut réussie pour la première fois par LOCKYER en 1869.

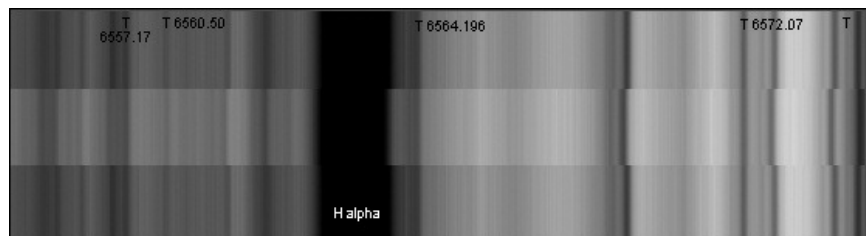


Figure 8 : Spectres à haute résolution (l'échelle indiquée en haut est en angströms) du centre du disque solaire pour les bandes supérieure et inférieure de cette photographie, et de l'extrémité (limbe Est) de son équateur pour la bande centrale ; les raies marquées T ne présentent pas de décalage, car ce sont des raies telluriques, i.e. dues à l'absorption par l'atmosphère terrestre et non pas par le Soleil. (figure tirée de l'adresse http://www.astrosurf.com/rondi/obs/shg/Effet_doppler.htm).

(8) Mais ce n'est plus vrai avec les filtres de LYOT ayant une bande passante de 0,01 nm ou moins. Pour résoudre ce problème, LYOT a montré qu'on peut réduire la variation de λ avec i en remplaçant dans ses filtres les lames biréfringentes simples par des lames composites dites « à grand champ » [9].

3.3. Formation de familles d'images parasites gênantes

Lorsque la luminosité de l'image solaire principale (I) donnée par le coronographe C1 est adéquate, on peut observer plusieurs images parasites (*cf.* figure 9) nettes dans le même plan que (I), donc assez gênantes, et de même dimension que (I) – donc très probablement dues à la formation d'images solaires parasites intermédiaires à l'infini par réflexion sur des faces planes :

- ♦ l'image (J) est orientée dans le même sens que (I), traduite par rapport à (I) dans son propre plan d'environ un sixième de diamètre angulaire du disque solaire $\phi \cong 32'$ – et en jouant sur les seuils de visualisation du traitement numérique des images on peut voir apparaître une suite d'autres parasites (J') et (J'') ayant les mêmes translations successives ;
- ♦ l'image (K) est retournée par rapport à (I), décalée par rapport à (I) d'environ $\phi/3$ sur la figure 9.

Nous allons voir que l'éclairement de chacune de ces images parasites, relativement à celui de l'image principale, serait beaucoup plus petit si les faces de F étaient moins réfléchissantes, mais alors sa finesse spectrale serait altérée...

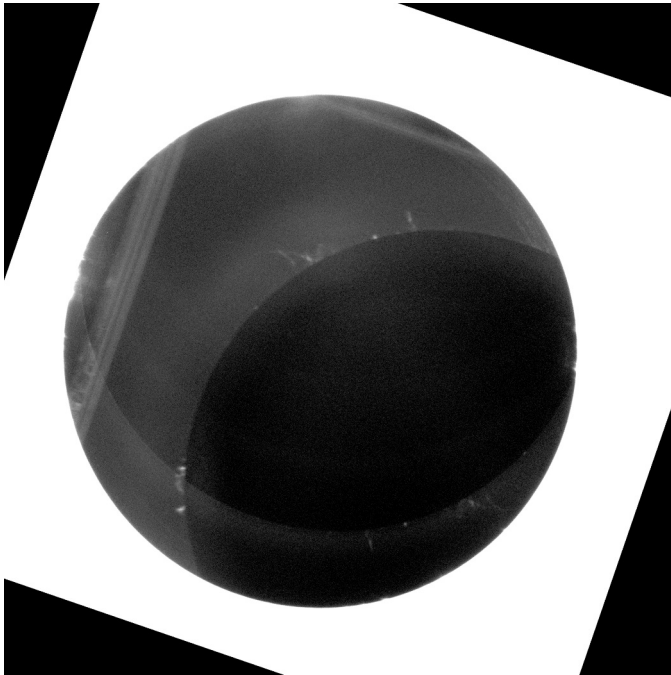


Figure 9 : Photographie traitée pour bien montrer les images parasites (J), (J'), (J'') et (K), les seuils de visualisation étant ajustés et les détails de faible luminosité accentués.

Une explication de (J) , (J') , (J'') , etc., invoque l'hypothèse qu'au moins une des lames (L_1) – d'indice de réfraction n_1 – du filtre interférentiel $H\alpha$ (situé entre O3 et O4) est légèrement prismatique, donc sa face fortement réfléchissante (F_1) forme un petit angle α_1 avec son autre face moins réfléchissante (F'_1) . Quant à l'autre lame (L_2) de ce filtre, sa face fortement réfléchissante (F_2) est en face de (F_1) et quasi parallèle à elle par construction : sinon la finesse du filtrage spectral par interférences entre les images multiples formées par les réflexions sur (F_1) et (F_2) serait dégradée de façon évidente par le décalage latéral entre les images.

Si (L_2) est plus près de O3 que (L_1) , des trajets parasites possibles pour la lumière entre le Soleil et la CCD comportent une faible réflexion sur (F'_1) , suivie d'une forte réflexion sur (F_1) ou (F_2) ; ces trajets produisent deux images parasites de même sens que (I) , mais confondues et dans le même plan que (I) – car (F_2) est parallèle à (F_1) et car les images intermédiaires du Soleil dans les espaces image de (F_2) , (F_1) et (F'_1) sont à l'infini. Ce processus explique donc la formation de (J) , dont la translation par rapport à (I) sur l'image serait dans une direction perpendiculaire à l'arête (A_1) du prisme formé par (L_1) et orientée vers sa base, de valeur angulaire $2n_1\alpha_1$, voisin de $\phi/6$ d'après la figure 9 ; avec $n_1 \cong 1,5$ on aurait donc $\alpha_1 \cong 1,8'$. La formation de (J') – resp. (J'') – s'explique en rajoutant une – resp. deux – paires de réflexions sur (F'_1) puis sur (F_1) ou (F_2) ...

Si (L_1) est plus près de O3 que (L_2) , la suite des parasites (J) , (J') , (J'') , etc. peut s'expliquer par une, deux, trois, etc. paires de réflexions sur (F_1) ou (F_2) puis sur (F'_1) .

De façon analogue, on peut expliquer la formation de (K) par une faible réflexion de la lumière formant (I) sur la CCD elle-même (qui est dans un plan, focal image de O4), puis une traversée de O4 dans le sens « retour », ensuite une forte réflexion sur (F_1) ou bien (F_2) , et enfin une retraversée de O4 dans le sens « aller » : la formation de (K) est une autocollimation de (I) par O4, ce qui explique que (K) est retournée par rapport à (I) et dans le même plan qu'elle. Bien sûr, il se forme de même une image parasite suivante (K') – retournée par rapport à (I) et dans le même plan qu'elle – par une faible réflexion de la lumière formant (I) sur la CCD, puis une traversée de O4 dans le sens « retour », une faible réflexion sur (F'_1) et de nouveau une retraversée de O4 dans le sens « aller ». La réflexion sur (F'_1) étant faible, contrairement à celle sur (F_1) ou (F_2) , cela

explique que (K') est moins lumineuse que (K) et qu'elle passe inaperçue, heureusement.

Ces explications sont jusqu'à présent corroborées par les tests effectués sur C1. On en déduit que, pour que la famille de (J) soit confondue avec (I) à un pixel près, comme il y a 2048×2048 pixels dans l'image il faudrait que le défaut de parallélisme des lames du filtre soit au moins trois cents fois plus petit, donc inférieur à $0,3''$. Ceci semble réalisé avec des filtres *Oriel* de « qualité image », mais leur dérive en température est nettement plus forte que celle des filtres *Barr Associates*.

4. APPORT ESCOMPTÉ DE CLIMSO EN ASTRONOMIE SOLAIRE

CLIMSO est un instrument utilisé dans le cadre d'un service d'observation « continu », fruit d'une collaboration entre l'Observatoire Midi-Pyrénées et l'association « *Les Observateurs Associés* ». Ce service a pour objectif la constitution d'une base de données d'observation pour l'étude de l'ensemble des phénomènes dynamiques se produisant dans les hautes couches de l'atmosphère solaire et dans la couronne : éruption ou disparition brusque de protubérances, petits jets polaires éphémères, éjection de matière coronale (dont le départ ne prend qu'une dizaine de secondes), etc. La conception de CLIMSO permet l'acquisition d'images calibrées dans différentes longueurs d'ondes, aussi bien au-dessus du limbe que sur la surface solaire. La fréquence de saisie des images peut être adaptée à la rapidité des phénomènes se produisant dans la chromosphère et dans la couronne solaire ; sa cadence maximale est d'une image toutes les neuf secondes sur chaque module de CLIMSO – ce qui est avantageux par exemple lorsqu'une protubérance disparaît brusquement, car juste avant sa luminance flashe puis oscille pendant quelques minutes. CLIMSO peut apporter ainsi des données complémentaires par rapport à celles des expériences spatiales. Déjà, les statistiques accumulées par *Les Observateurs Associés* semblent montrer que le premier signe précurseur de la re-croissance de l'activité solaire qui met fin à la période de minimum du cycle solaire est l'augmentation des petits jets polaires.

La couronne solaire est un plasma peu dense, baigné dans un champ magnétique prenant sa source sous la photosphère solaire. Ce plasma s'avère très hétérogène dans sa densité et dans sa température. La composition chimique et les propriétés de ces régions sont accessibles grâce à la spectro-coronographie qui montre au-dessus du limbe un spectre de raies d'émission coronales, raies souvent « interdites » (au sens de la physique atomique) pour celles qui sont émises dans le domaine du spectre visible.

Les deux coronographes de CLIMSO permettent l'acquisition rapide et simultanée d'images : d'une part dans la raie $H\alpha$, signalant les structures les plus « froides » de la couronne solaire, car l'hydrogène atomique peut y subsister partiellement (au niveau des protubérances notamment, mais aussi de la partie « froide » des éruptions solaires ou des grandes éjections de matière coronale) ; d'autre part dans une raie de $He\ I$ (qui montre encore les protubérances un peu différemment), ou de $Fe\ XIII$ à $1074,7$ ou bien $1079,8\text{ nm}$, sachant que l'abondance de l'ion Fe^{12+} passe par un maximum à 1,8 million

de kelvins – une valeur « chaude », proche de la température moyenne du plasma coronal. De plus, les équations de bilan détaillé à l'équilibre statistique pour les populations de l'ensemble des niveaux d'énergie de Fe^{12+} , montrent qu'à une température donnée (de l'ordre du million de kelvins) le rapport de l'intensité de cette dernière raie d'émission sur celle de l'avant-dernière est une fonction croissante de la densité d'électrons libres [10-13]. Les clichés avec Fe XIII ne montreront pas de protubérances (il n'y en a pas pour les parties chaudes de la couronne) ; mais, correctement calibrés (après soustraction de la lumière parasite enregistrée dans le continuum entre les deux raies de Fe XIII), ils apporteront des informations complémentaires sur la densité électronique de la couronne solaire intégrée sur la ligne de visée dans les régions observées, sans qu'il soit nécessaire d'émettre des hypothèses sur la répartition de Fe^{12+} . Cette tâche est plus ardue que l'observation des protubérances : la luminance de la couronne chaude sur ces raies de Fe XIII est cent à mille fois plus faible que celle des protubérances dans la raie $\text{H}\alpha$, et elle dépasse à peine d'un facteur 10 la luminance d'un ciel dans les conditions « coronales » (*i.e.* les moments où il est bien clair et pur) au Pic du Midi.

Les images fournies par les deux coronographes de CLIMSO montreront donc à la fois les structures « froides » de la couronne et ses parties « chaudes », et surtout leurs évolutions lors des phénomènes solaires, tout en permettant une mesure de la densité électronique dans les régions chaudes.

Les relations entre ces régions de températures très différentes sont très mal connues. Comment leur pseudo-équilibre peut-il s'établir et se maintenir ? Quels sont les échanges thermiques entre ces régions qui s'interpénètrent ? Comment se comporte le voisinage coronal « chaud » d'une protubérance, lorsque celle-ci évolue au cours des phases de son existence ? Comment la matière coronale « chaude » est-elle drainée lors de la phase ascendante d'une grande envolée d'une protubérance ? CLIMSO devrait apporter de précieuses données d'observation sur ces questions qui restent pour l'instant très ouvertes.

Une autre particularité de CLIMSO est d'associer à ces observations de la couronne des observations du disque solaire dans son entier, dans deux longueurs d'onde différentes grâce à deux lunettes solaires équipées de filtres interférentiels étroits. L'une des séries d'images montre le disque solaire observé dans le cœur de la raie $\text{H}\alpha$, et l'autre montre le disque solaire dans la raie K (de Ca II) – ces deux raies étant en absorption sur le disque. L'hydrogène et l'ion Ca^+ sont présents dans les mêmes couches de la chromosphère. Mais la raie $\text{H}\alpha$ (produite par une entité neutre) montre plutôt le réseau fibreux chromosphérique et les filaments sombres solaires (*i.e.* les protubérances vues sombres sur le fond de la photosphère plus chaude qu'elles, grâce au phénomène de renversement de raie⁽⁹⁾);

(9) Ce phénomène est sensible seulement sur la largeur de la raie d'absorption ; donc si L1 utilisait un filtre de 0,25 nm de bande passante, bien plus large que cette raie d'absorption, les filaments ne seraient quasiment plus visibles.

tandis que la raie K (produite par un ion positif) montre plutôt le réseau magnétique, visualisé par un ensemble de petits points brillants (les *floculi*, se concentrant essentiellement autour des tubes magnétiques émergents) et par les plages faculaires (nuages lumineux au-dessus des taches solaires). L'observation montre que les mouvements de l'hydrogène et du calcium sont différents ! Il sera intéressant de comparer les évolutions de ces images sur des phénomènes comme la déstabilisation des filaments solaires lors des mini-éruptions solaires ou lors de propagation d'ondes de MORETON se produisant au cours des phases préventives des éruptions solaires...

Les observations du soleil se font aujourd'hui de plus en plus dans le cadre de campagnes d'observations multi-instruments. Les principales caractéristiques de CLIMSO ont été choisies en fonction des expériences spatiales solaires qui se mettent en place comme STEREO, SDO, CORONAS PHOTON, et HINODE qui consultent les images de CLIMSO sur la base de données <http://bass2000.bagn.obs-mip.fr>

CONCLUSION

Un coronographe est un instrument très spécifique, à cause de deux particularités essentielles. D'abord, il réalise une éclipse artificielle, au sens où un bord de la lucarne d'entrée (pour sa définition, voir [4] p. 85-86) est à l'infini, car celui-ci est l'antécédent du bord de l'occulteur interne par l'objectif ; cette lucarne se comporte donc comme la Lune qui, par son grand éloignement, permet de laisser voir parfaitement la très basse couronne tout en cachant complètement le disque solaire – alors qu'un occulteur externe, beaucoup plus proche devant l'objectif et cachant entièrement le disque solaire, ne permet pas de montrer la basse couronne *dans le champ de pleine lumière*. Ensuite, un coronographe est un système où le taux de lumière diffusée au sein de l'instrument doit être particulièrement bas – l'un des plus bas de tous les instruments d'optique : de l'ordre du taux de la lumière diffusée par le ciel, voire moins.

Un coronographe est donc un instrument subtil ; sa réalisation exige des compromis, car les considérations financières ne pourront pas être omises.

Dans le cas de CLIMSO, le budget initial (200 000 €) nous a permis de monter un instrument qui donne des images principales gratifiantes, dont la richesse des nuances et des détails dans les protubérances dépasse nettement celle de HACO ; mais des efforts qui s'annoncent onéreux devront porter sur la qualité des lames du filtre interférentiel, ou sur le traitement antireflet de la caméra CCD, pour réduire les images parasites nettes dans le même plan que l'image principale. La finesse d'image le rend aussi plus sensible aux turbulences internes dans l'instrument ; les trappes de visite au niveau de l'occulteur permettront d'apporter quelques modifications pour essayer de les diminuer en fonction des circonstances. CLIMSO est donc un instrument évolutif.

En 2007 seules certaines parties de CLIMSO étaient opérationnelles, mais la qualité de ses images ainsi que leur accessibilité par internet étaient déjà très appréciées par le *Programme National Soleil-Terre* du CNRS, et par les responsables du satellite japonais

d'observation solaire HINODE. Grâce au suivi simultané de la couronne et du disque par CLIMSO, un premier résultat intrigant pour la physique solaire commence à apparaître : la coexistence d'un disque du Soleil très calme en cette période de minimum d'activité, avec une couronne plutôt dynamique déjà (cf. figure 2) ! Pour le prochain maximum d'activité solaire en 2011, CLIMSO devrait être totalement installé ; on espère recueillir alors une masse de données intéressantes, grâce à un des points forts de cet instrument – par exemple, la comparaison des images coronales dans deux raies de Fe XIII.

REMERCIEMENTS

À Frédéric DELBORD, pour la photo de couverture ; à Raphaël JIMENEZ, pour la photographie de la figure 7 ; à l'équipe des *Observateurs Associés*, qui met quotidiennement les images solaires à disposition sur le site internet « bass2000 » ; à André ROND pour la figure 8 ; et à Christian LATOUCHE, pour son mécénat qui couvre intégralement la fabrication, mais aussi le fonctionnement de CLIMSO.

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] SALLEZ A. « CLIMSO : c'est parti ! ». *Astronomie magazine*, novembre 2007, n° 95, p. 34-36.
- [2] PASKOFF M.-C. « L'astronomie au Pic du Midi : du nouveau dans la continuité ». *L'astronomie*, 2008, **122**, p. 34-40.
- [3] Voir par exemple (pages consultées le 28 février 2008), *Coronado Solarmax 90*, [En ligne]. Adresses URL :
<http://www.opticsforyou.com/product-9790-42-1-1.html>
<http://www.escience.ca/telescopes/RENDER/5/2034/3097/12675.html>
- [4] DETTWILLER L. *Les instruments d'optique – Étude théorique, expérimentale et pratique*. 2^e édition, Paris : Ellipses, 2002.
- [5] BELY P. Y. (éd.). *The Design and Construction of Large Optical Telescopes*. Berlin ; Springer, 2003, chap. 5.
- [6] DANJON A. et COUDER A. *Lunettes et télescopes – Théorie – Conditions d'emploi – Réglage*. Paris : Librairie scientifique et technique Albert BLANCHARD, 1990, p. 523-536.
- [7] OJEDA-CASTAÑEDA J. « Foucault, Wire, and Phase modulation Tests », in D. MALACARA éd., *Optical shop testing*, 2^e édition, New York : Wiley, 1992, chap. 8.
- [8] BELVAUX Y. « Réalisation optique de la transformée de Hilbert et applications », Thèse d'état, Université d'Orsay, 1973.
- [9] FRANÇON M. *Séparation des radiations par les filtres optiques*. Paris : Masson, 1984, p. 60-62.
- [10] FINN G. D. et LANDMAN D. A. *Solar Physics*, 1973, **30**, 381.

- [11] FLOWER D. R. et PINEAU DES FORÊTS G. *Astron. and Astrophys.*, 1973, **24**, 181.
- [12] NOËNS J.-C., PAGEAULT J. et RATIER G. *Solar Physics*, 1984, **94**, 117.
- [13] KOOMEN M. J., DETWILER C. R., BRUECKNER G. E., COOPER H. W. et TOUSEY R.
« White Light Coronagraph in OSO-7 ». *Applied Optics*, 1975, **14**, p. 743-751.
- [14] Voir par exemple (pages consultées le 28 février 2008), CLIMSO ? Quoi ? Qui ?
Comment ? Combien ?, [En ligne]. Adresse URL :
<http://www.climso.fr/QuoiQuiCommentCombien/CLIMSO-QuoiQuiCommentCombien.html>



Luc DETTWILLER
*Professeur en PC**
 Lycée Blaise Pascal
 Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme)



Jacques-Clair NOËNS
Astronome
 Laboratoire d'Astrophysique de l'Observatoire Midi-Pyrénées
 Observatoire du Pic du Midi
 Tarbes (Hautes-Pyrénées)