Construction d'un coronographe d'amateur
Observations solaires

André & Sylvain RONDI

Manuscrit de l'article paru dans l'Astronomie, revue de la SAF, vol 117, Septembre 2003
(Corrigé de quelques erreurs par rapport à la publication originale.)

Introduction

Parmi les instruments d'observations que connaissent les astronomes amateurs, il en est un qui ne laisse généralement pas indifférent : le coronographe. Il a la réputation (sûrement exagérée) d'un instrument difficile à construire et à régler et reste finalement assez peu répandu. Il y a quelques années, nous avons souhaité en savoir plus, et tenté de nous lancer dans la construction d'un coronographe.

Avant d'aller plus loin, revenons sur l'historique du coronographe et sur sa définition exacte.

Le coronographe de Lyot

C'est à l'astronome Bernard Lyot (1897-1952) que nous devons la mise au point du coronographe, au début des années 30. Depuis longtemps les astronomes avaient cherché à observer hors éclipse la couronne solaire. Leurs tentatives de mise au point d'instruments occultant artificiellement le Soleil s'étaient toutes soldées par des échecs.

Bernard Lyot, en menant une analyse poussée des causes atmosphériques et instrumentales empêchant l'observation, finit par aboutir à un schéma optique permettant de les minimiser (fig.1).

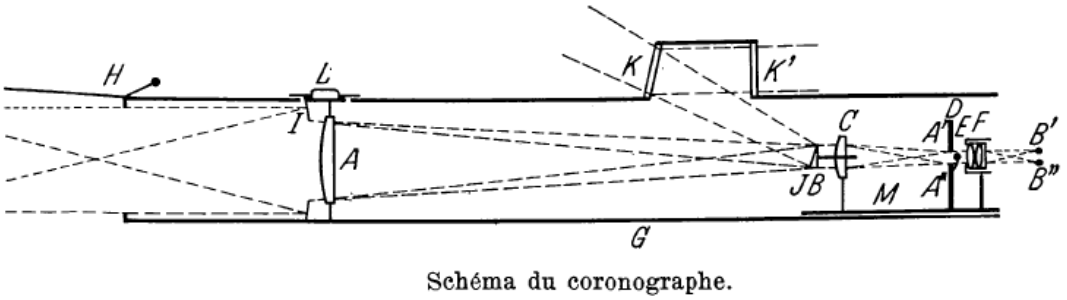

Figure 1: Le coronographe de Lyot, dans son article de 1932

Les innovations de l'époque passaient par la sélection d'un verre de qualité et par un polissage très soigneux pour la lentille principale, et également par l'utilisation d'une lentille de champ et d'un diaphragme afin de "bloquer" la lumière diffusée par l'instrument (issue de la diffraction de la lumière par les bords de la lentille, réflexions internes sur les faces, diffusions par défauts du verre et poussières).

Restent les causes "atmosphériques": la diffusion de la lumière par l'atmosphère et par les particules de poussière en suspension dans l'air. Comme on le voit sur le diagramme suivant (fig.2), l'observation de la haute couronne solaire en dehors des éclipses et avec un simple coronographe est assez illusoire. En revanche, on a accès à l'observation de la basse couronne et surtout des protubérances. Il est bien évident qu'un ciel de plaine ou un ciel pollué ne permettra que l'observation des protubérances brillantes tandis qu'un ciel de montagne donnera accès aux protubérances les plus faibles de la basse couronne.

Comme on le verra plus loin, l'adjonction d'un filtre H-alpha facilitera l'observation sous un ciel plus diffusant. Bernard Lyot est d'ailleurs l'inventeur du filtre monochromateur portant son nom et qui, par une combinaison de lames de quartz et de polariseurs, permet l'observation de la couronne dans une longueur d'onde précise. De nos jours, les filtres monochromatiques sont conçus à base de dépôts de couches minces et sont bien moins volumineux.

On parlera donc dans cet article de "coronographe H-alpha".

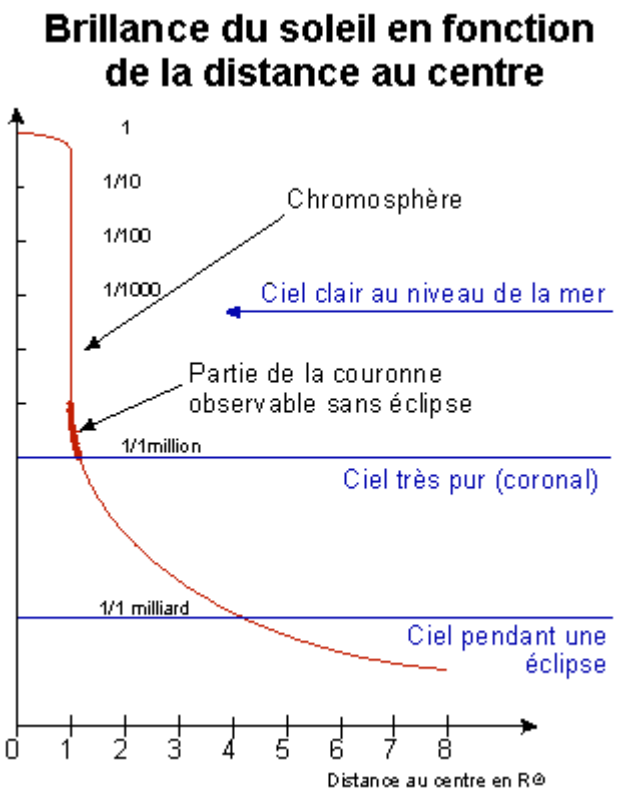

Figure 2: Brillance du Soleil en fonction de la distance au centre

Le calcul d'un coronographe

Principe optique

Nous allons ici décrire le fonctionnement optique du coronographe:

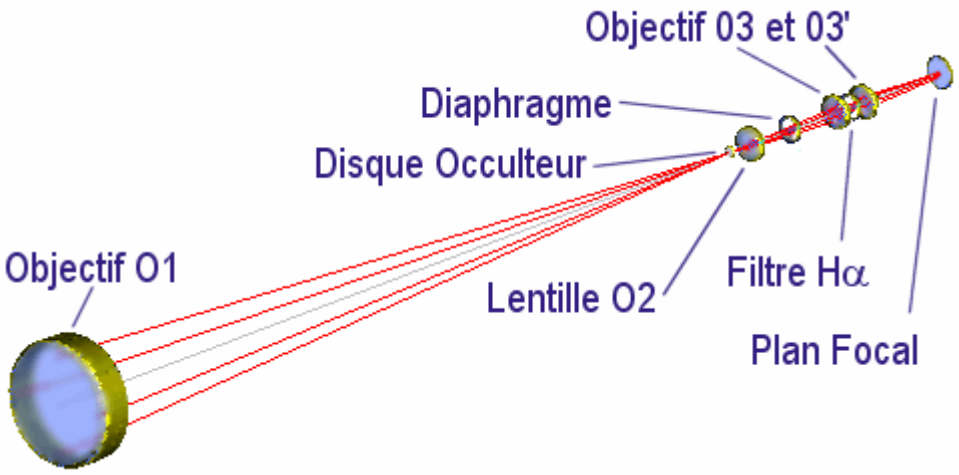

Figure 3 - Désignation des éléments du coronographe

L'objectif O1 peut être un doublet achromatique ou une lentille simple (éventuellement asphérique). Effectivement, il est possible de rendre asphérique l'une des faces de la lentille O1 (plan convexe) de telle façon que l'aberration sphérique soit corrigée pour une longueur d'onde donnée. Le travail est analogue à la taille d'une lame de Schmidt. Ayant nous-même taillé trois lames de Schmidt de bonne qualité, nous savons ce que cela demande comme temps et comme efforts et nous déconseillons

fortement cette solution aux amateurs qui seraient tentés par la construction d'un coronographe. Cependant, les constructeurs audacieux se reporteront avec intérêt sur l'article "*The interference polarizing monochromator*" par Edison PETTIT.

L'objectif O1 forme l'image du Soleil à son foyer, sur le disque occulteur qui couvre exactement l'image du disque solaire. Seuls subsistent les rayons lumineux provenant de la couronne solaire. La lentille O2 donne de l'image du Soleil occulté une image virtuelle, translatée de quelques mm en direction de O1, et donne de l'objectif O1 une image réelle sur le diaphragme. Ce dernier permet de se débarrasser de la lumière parasite diffractée par le pourtour de l'objectif O1.
Les objectifs O3 et O3' (formés par deux doublets) donnent de l'image virtuelle du disque occulté préalablement formée par O2 une image réelle observable à l'oculaire ou reçue sur la pellicule d'un appareil photographique. Entre les deux éléments O3 et O3', les rayons lumineux sont parallèles, ce qui permet d'utiliser un filtre monochromatique H-alpha dans les meilleures conditions. Nous parlerons de ce filtre un peu plus loin.

Formulaire de calcul

Voici maintenant une partie plus théorique, mais indispensable pour choisir et placer convenablement les éléments optiques. Il s'agit de calculs d'optique géométrique (approximation de Gauss) qui ont l'avantage d'être très simples. Ils donnent donc des résultats approximatifs mais largement suffisants pour le placement des composants pourvu que l'on réalise correctement le réglage optique final de l'appareil (indiqué plus loin).
Afin de mener à bien ces calculs, on va se placer dans le cas d'un amateur disposant de composants optiques et voulant savoir s'ils peuvent être utilisés dans le montage et dans quelles positions les placer (en effet, dans la plupart des cas, le constructeur amateur voudra réutiliser une lunette comme "base" de son coronographe et il lui faudra déterminer les éléments restant).
Admettons que l'on ait les éléments suivants:

- Un objectif de focale F=1000mm pour O1 (Diamètre D=90mm)
- Une lentille de focale f=200mm pour O2
- Deux objectifs de focales identiques f3=300mm pour O3 et O3'

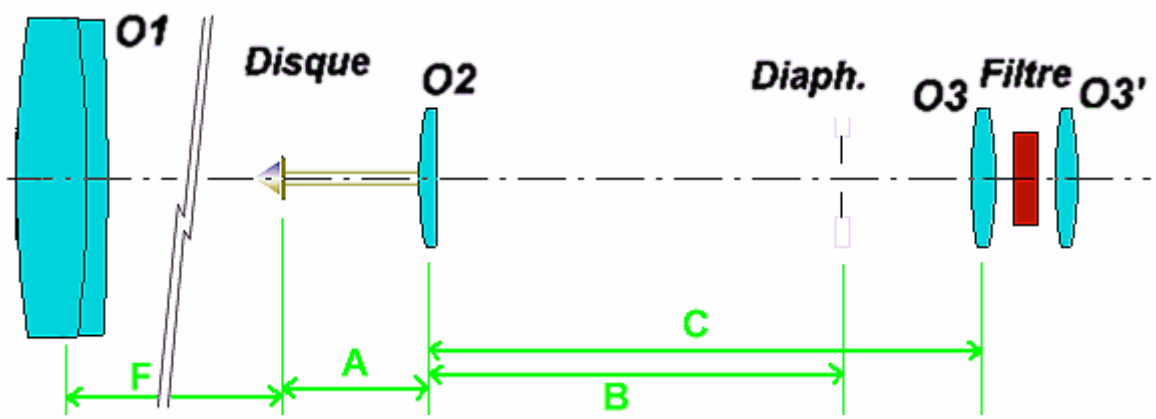

Figure 4 - Notation des placements mutuels des éléments

Comme on le voit sur la figure 4, le disque est placé au foyer de l'objectif O1 afin de cacher l'image du disque solaire.
Il faut alors choisir la distance A entre le disque et la lentille O2: prenons par exemple A=30mm. Cette distance est laissée au choix du concepteur et peut éventuellement varier dans de faibles proportions.
On calcule maintenant la position du diaphragme, qui sert à bloquer l'image du bord diffracté de l'objectif O1. Cette image de O1 fournie par O2 est une image réelle formée en arrière de O2 à une distance B telle que:

$$B = \frac{1}{\frac{1}{f} - \frac{1}{F + A}} = \frac{1}{\frac{1}{200} - \frac{1}{1000 + 30}} \approx 248.2(\mathrm{mm})$$

Il faudra donc placer le diaphragme à 248mm en arrière de la lentille O2.
On va maintenant calculer une distance intermédiaire utile à la suite du calcul: il s'agit de la position de l'image du soleil occulté (donc du disque occulteur) que fournit O2. Comme l'on a A=30mm et f=200mm (focale de O2), il s'agit d'une image virtuelle située en avant de O2, à une distance x par rapport à O2 telle que:

$$x = \frac{1}{\frac{1}{f} - \frac{1}{A}} = \frac{1}{\frac{1}{200} - \frac{1}{30}} \approx -35.3(\mathrm{mm})$$

Le signe (-) signifiant bien que l'image virtuelle est en avant de O2. Pour le reste des calculs, on prendra x en valeur absolue, soit x=35.3mm.
L'objectif O3 va recueillir cette image virtuelle fournie par O2 et la "transporter" afin qu'elle passe dans le filtre H-alpha en lumière parallèle. Il faut pour cela que la distance entre l'image virtuelle et O3 soit égale à la distance focale de O3, soit 300mm.

On a donc: **C = f3 - |x| = 300 - 35.3 = 264.7 (mm)**

L'objectif O3' reçoit de la lumière parallèle, il peut donc être à priori n'importe où derrière le filtre et O3. Cependant, on s'arrangera pour que O3, le filtre et O3' soient les plus rapprochés possible les uns des autres pour rendre maximum le champ de pleine lumière. L'image finale du soleil occulté donnée par le coronographe sera alors située à F'3 = 300mm en arrière de O3'.
A noter que la focale résultante du système est égale à F'=F.(F'3/F3). On a donc intérêt a prendre F'3=F3 afin de ne générer aucun grandissement ou rapetissement de l'image (afin de conserver la définition initiale de l'image). Les objectifs O3 et O3' ne servent donc qu'à transporter l'image du soleil occulté. Il découle du résultat précédent que la taille de l'image de sortie variera aussi en fonction du rapport F'3/F3. Si celui-ci vaut 1, l'image du Soleil en sortie a la même taille que celle de l'image virtuelle fournie par O2 (très proche donc de celle fournie par O1).

Il peut être intéressant de calculer le diamètre maximum $\mathbf{d_{diaph}}$ du diaphragme:

$$d_{diaph} = \frac{B.D}{F + A} \approx 21.7(\mathrm{mm})$$

Si l'on prévoit d'utiliser un diaphragme réglable, ne pas perdre de vue qu'il est difficile de trouver un diaphragme d'un diamètre dépassant 25mm. Au-delà de cette dimension, il devient rare sur le marché de l'occasion... et très cher. On tachera de ne pas s'éloigner beaucoup des valeurs que nous avons adoptées.
A défaut, prévoir un diaphragme fixe: simple trou d'un diamètre inférieur de quelques mm à la valeur calculée ci-dessus.

Les diamètres des objectifs O3, O3' et du filtre découlent de cette valeur. En effet, le diaphragme, les deux objectifs et le filtre doivent être positionnés le plus proche possible les uns des autres (bien choisir en conséquence les focales de O2 et O3... suivant les disponibilités du marché et du budget... ou des fonds de tiroirs).
Pour rester réaliste, et si l'on adopte la solution économique que nous préconisons, on utilisera pour O3 et O3' deux objectifs issus de jumelles classiques dont le diamètre est généralement supérieur à 30mm. On voit alors qu'il n'y a aucun souci de vignettage en le comparant au diamètre du diaphragme.

Il n'en va pas de même du choix du filtre interférentiel qui n'existe généralement qu'en un petit nombre de tailles aux catalogues. Le choix sera guidé par la largeur de bande passante (comme détaillé plus bas) et par la profondeur de votre porte-monnaie... les prix augmentant beaucoup avec le diamètre. Une taille d'environ 25mm (~1") est un bon compromis, que nous avons adopté.

<u>Remarque:</u> Comme on l'a vu, le calcul ci-dessus s'est bien déroulé et donne des valeurs de placement cohérentes. Il n'en va pas toujours de même... en effet, il se peut que dans certains cas l'on trouve B>C (ce qui placerait le diaphragme en arrière de O3, ce qui est bien sûr impossible).
Il est donc parfois nécessaire de modifier certaines distances (la distance A, la focale f de O2 ou bien les focales de O3 et O3') pour aboutir à un montage réalisable.

Pour cela, une application de type tableur peut être très utile, puisque l'on peut faire varier les différentes valeurs et que le calcul est réalisé automatiquement par l'ordinateur. Nous tenons à la disposition des personnes intéressées une telle feuille de calcul (format Excel ou autre) et également un programme autonome (CORO.EXE, programmé en Visual Basic) qui réalisent ces calculs (disponibles sur notre page Internet – v. annexes).

Pour finir, on peut aborder le calcul du diamètre des disques occulteurs. En effet, la distance Terre-Soleil varie au cours de l'année et le diamètre apparent du Soleil (alpha) s'en trouve changé, de environ 1891 arcsec (secondes d'arc) le 4 Juillet (minimum) à environ 1955 arcsec le 4 Janvier (maximum). On peut calculer les diamètres des disques occulteurs par la formule:

d = 2.F . tan(alpha/2)

Que l'on simplifie en:

d = F . [diamètre du soleil en secondes d'arc] / 206265

avec

- d = le diamètre du disque recherché (mm)
- F = la focale de l'objectif (ici 1000)
- ... et 206265 représentant le nombre de secondes d'arc dans 1 radian, soit ((180 x 3600) / Pi)

Il s'agit bien sûr d'une simplification due au faible diamètre apparent du Soleil, là aussi largement suffisante puisque l'utilisateur choisira souvent son disque occulteur selon la turbulence, l'état du ciel, et selon qu'il veut plutôt sous-occulter ou sur-occulter le Soleil (une sur-occultation étant préférable pour la sécurité).

Dans la pratique on peut se contenter de 3 ou 4 disques occulteurs, mais on peut aussi choisir d'en faire toute une gamme. Nous avons utilisé de simples rondelles d'acier vendues en magasin et taillées en biseau. Si l'on dispose d'un tour, le plus simple est d'en usiner un grand nombre approchant les côtes calculées puis de les trier en les mesurant après usinage (car il est difficile de tailler un diamètre précis du premier coup).

Figure 5 - Disques occulteurs

Sur la figure 5, les disques occulteurs taillés et portant une numérotation gravée permettant de les trier rapidement. On voit aussi (au centre) une rondelle non encore taillée, ainsi que l'outil en laiton nous servant à fixer les rondelles pour les usiner au tour.

La réalisation

Dans cette partie, nous exposons les détails de fabrication du coronographe que nous avons réalisé. Ce n'est bien sûr pas la seule façon d'en construire un (comme le montre la grande diversité des réalisations d'amateurs), mais cela peut donner des idées de base.

Caractéristiques et principe adopté

Afin d'avoir un coronographe facile à régler et (au besoin) évolutif, nous avons choisi une disposition des éléments dans un tube de section carrée en contreplaqué (disposition inspirée directement de la réalisation de P.Bourge et P.Mazereau dans leur livre – voir bibliographie).
La fabrication en est plus facile et l'on a un accès direct à tous les éléments par un couvercle supérieur.
Notre objectif O1 fait partie d'une lunette Meade et plutôt que de la démonter, nous avons préféré la placer sur un berceau en bois, coulissant dans le tube carré, et dont la position avant-arrière est réglable de l'extérieur par tige filetée (que l'on aperçoit en bas de la photo en figure 6).

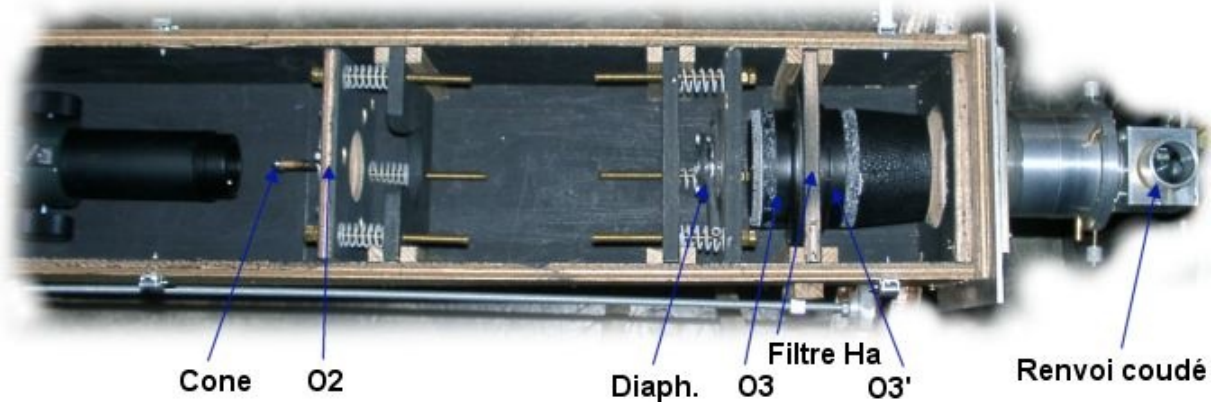

Figure 6 - photo de l'intérieur du tube

Le support de la lentille O2 et du diaphragme est en deux parties: une première planchette carrée qui se place dans des rainures du tube (comme un tiroir) et une seconde planchette carrée, support proprement dit de la lentille. Ces deux planchettes sont reliées par un système de trois tiges filetées et ressorts ce qui permet de régler avec précision la position avant-arrière de la lentille O2 dans le tube. Le même système a été adopté pour le support du diaphragme. L'ensemble O3 + filtre + O3' est aussi placé sur un "tiroir". Concernant l'orientation des objectifs O3 et O3' (issus de jumelles), il est préférable de les placer avec leur face extérieure (la face extérieure des jumelles d'origine) orientée vers le filtre H-alpha puisque le filtre doit travailler en lumière parallèle. De cette manière (conforme à l'utilisation normale des objectifs de jumelles) la qualité des images sera meilleure.

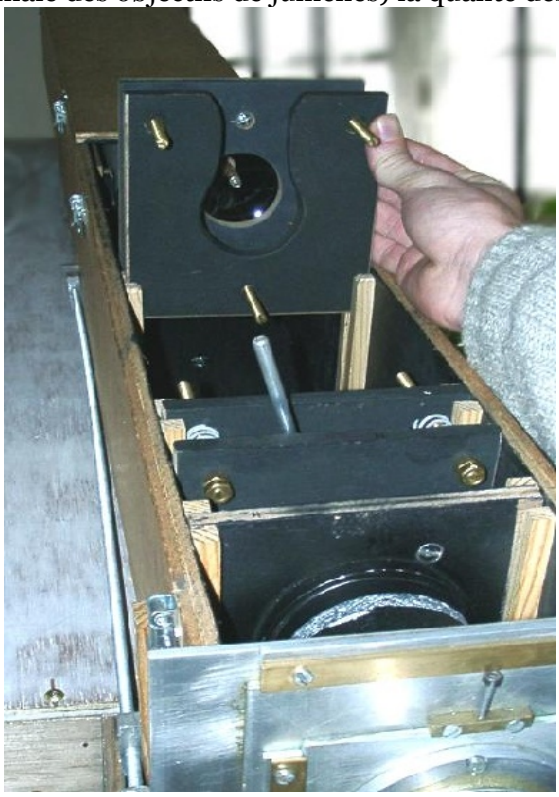

Figure 7 - "Tiroir" portant la lentille O2

Le système occulteur

Il s'agit d'un point important. On a déjà vu précédemment comment étaient usinés les disques occulteurs, voyons maintenant plus en détail l'ensemble constitué par la lentille O2, le cône, le disque occulteur et sa tige porte-cône.
Le cône occulteur est nécessaire pour évacuer la majorité du flux lumineux du Soleil vers le pourtour du tube. Sa forme conique s'usine facilement au tour et permet l'évacuation de la lumière perpendiculairement à l'axe optique, évitant ainsi des réflexions parasites sur les lentilles.
La tige portant le cône et le disque est fixée sur la lentille O2. On peut choisir de la coller, ce qu'ont fait quelques amateurs... et il est vrai que percer une lentille de verre est assez périlleux. Nous l'avons mené à bien lors d'une première version du coronographe, mais cela reste une opération assez longue et délicate: malgré tout le soin apporté, il reste souvent de minuscules éclats sur le bord du trou qui peuvent éventuellement diffuser la lumière.
Nous avons trouvé une solution efficace en utilisant une lentille de verre organique (absolument neuve et exempte de la moindre rayure!) achetée chez un oculiste: en effet, cette matière plastique se perce très bien et sans éclats avec de simples forets à bois. Ce type de lentilles convient tout à fait à son rôle de lentille de champ: nous n'avons noté aucune dégradation d'image par rapport à la lentille en verre BK7 de notre premier montage.
De par sa facilité de mise en œuvre, cette solution du verre organique s'impose à l'amateur constructeur pour cet usage spécifique tout au moins.

Figure 8 – Le système d'occultation monté sur la lentille O2

Il ne reste plus qu'à fabriquer une petite pièce filetée en aluminium (insert) qui rentre dans le trou et que l'on fixe avec un soupçon de colle cyanoacrylate (figure 9).

Figure 9 - L'insert en aluminium collé dans la lentille 02

L'insert ne doit pas silhouetter l'image. Pour cela, son diamètre **p** doit être inférieur à:

$$p = d - \frac{A.(D-d)}{F} \approx 6.3(mm)$$

(notations conformes aux calculs précédents)
On est alors assuré de bénéficier d'un champ de pleine lumière de 5.5°, qu'on est loin d'utiliser.

Passons maintenant à la fabrication du porte-cône. Le cône occulteur est directement au foyer de l'objectif et chauffe énormément. Après nous être brûlé le bout des doigts en changeant le disque occulteur au cours des observations, nous avons eu l'idée de faire un porte-cône en trois parties: une partie laiton supportant le disque et le cône, une partie en verre servant d'isolant thermique et une autre partie laiton servant à la fixation sur O2. Le tube de verre utilisé provient d'un tube utilisé en chimie et il est emmanché et collé sur les parties laiton.
Ainsi, le tube de verre reste froid et l'on peut le manipuler bien plus facilement. De plus, comme on a une isolation, l'insert et la lentille sont aussi protégés de la chaleur.

Figure 10 - La tige, le cône et le disque démontés

Le diaphragme

Nous avons utilisé un diaphragme variable à iris, mais l'expérience montre que le diamètre du diaphragme n'a pas à être changé souvent (parfois selon la qualité du ciel). On peut donc tout à fait prévoir un diaphragme fixe (simple trou) déterminé par calcul (diamètre de l'image de l'objectif O1 donnée par la lentille O2, légèrement minoré), ou expérimentalement.

Le filtre H-alpha

C'est un point-clé du coronographe, et la détermination du type de filtre à utiliser est importante. Comme on l'a vu, son utilisation est obligatoire pour un ciel "commun", puisqu'il augmente globalement le contraste sur les protubérances.
Ce filtre est un filtre centré sur la raie H-alpha, de longueur d'onde 656.3 nm (ou 6563 Ångströms). Un tel filtre est caractérisé par une "largeur à mi-hauteur" (ou FWHM en anglais). Cette quantité (exprimée en nm ou en Ångströms) représente sa bande passante, sa sélectivité: plus cette largeur est faible, plus le filtre est sélectif et augmente le contraste... en contrepartie, plus il est cher!
Les critères de choix d'un bon filtre sont assez délicats à déterminer: il doit être assez sélectif... mais pas trop!
En effet, un filtre de bande passante inférieure à 1 Ångström ne se justifie pas: les protubérances apparaîtront alors sans coronographe, avec le risque de voir "disparaître" les protubérances les plus faibles... de plus, son prix est généralement très élevé, avec un risque de détérioration au fil des ans (très variable selon le type de filtre, le stockage,...). En outre, ce type de filtre est généralement thermostaté, ce qui rajoute une contrainte supplémentaire. Rappelons que l'un des buts est de mettre au point si possible un instrument simple et peu onéreux, à la portée de tout amateur ou club.

Figure 11 - Le filtre H-alpha, derrière l'objectif O3

Nous nous sommes donc dirigés vers un filtre interférentiel plus simple et non thermostaté, de diamètre 25mm:
Le premier filtre utilisé avait une bande passante de 10nm (100 Ångströms). Il nous a coûté aux environs de 150 Euros auprès de Melles-Griot et nous a permis de faire de bonnes observations. Cependant, un tel filtre ne peut servir qu'avec un très bon ciel!
De plus, la qualité d'un tel filtre varie selon les fournisseurs: un échange avec David Groski (un autre amateur américain) a révélé que le filtre 10nm commercialisé par Edmund Optics n'est pas de même qualité que le 10nm de Melles-Griot par exemple: il apparaît que même si la largeur de bande passante est la même (environ 10nm) pour les deux filtres à 90% de transmission, le filtre d'Edmund a en revanche une plus grande bande passante à 20% (en d'autres termes, les "ailes" de la gaussienne sont plus étalées). Ceci a pour effet de diminuer le contraste, et selon les tests réalisés par David (confirmés ultérieurement par Ramiro Hernandez, un amateur mexicain), le 10nm d'Edmund n'a pas donné de résultats. Donc attention!...
Nous sommes ensuite passés à un filtre de 1nm (10 Ångströms) de chez Lot-Oriel: le contraste est bien meilleur et il est possible d'observer avec un ciel plus épais, voire très légèrement voilé (conclusions identiques d'après David Groski); la contrepartie est un prix plus élevé, plus de 300 Euros. Dans la même gamme, on peut aussi signaler d'autres fournisseurs comme Andover ou Maiers Photonics, dont les prix peuvent descendre jusqu'à 150 Euros.
Pour information, la transmission du filtre Melles-Griot est de 73% au pic H-alpha, et celle du filtre Lot-Oriel est de 40% au pic H-alpha. Ces filtres sont composés de la multicouche diélectrique interférentielle et d'un filtre passe-bande rouge (le support). De ce fait, par exemple le filtre Lot-Oriel est bloquant sur tout le spectre, en dehors de sa bande passante H-alpha.
Enfin, on peut signaler que J-M Roques avait fabriqué en 1960 un coronographe muni d'un simple filtre rouge Wratten n°70 (environ 100nm de bande passante, et autour de 15 Euros!...) avec des résultats tout à fait bons (voir l'Astronomie, 1961 p.67-72), solution de loin la plus économique... nous n'avons jamais testé cette solution: elle requiert certainement un ciel excellent, un instrument et un suivi parfaits. De plus, l'intensité du Soleil non totalement occulté à travers un tel filtre est énorme et la moindre négligence peut être fatale pour l'œil de l'observateur!!

Le filtre neutre... et les précautions d'emploi

Le coronographe est un instrument d'observation solaire, et à ce titre, rappelons que l'observation du Soleil ne doit jamais être prise à la légère!!
Un décentrement brutal du Soleil donne une image très intense. En effet, généralement, le filtre H-alpha ne fournira pas une atténuation suffisante pour une protection totale dans ce cas de figure. Il est donc indispensable de prévoir un filtre neutre assez puissant pour permettre un centrage du Soleil adéquat... et faisant office de protection immédiate en cas de problème! Ce filtre peut être constitué d'un filtre pour masque de soudure à l'arc dont la qualité optique est très bonne et qui existe en plusieurs grades de densité. On adaptera celle-ci de manière à permettre un centrage en toute sécurité.
Ce filtre de protection doit pouvoir être manœuvré depuis l'oculaire (par un dispositif de câble coulissant par exemple) de manière assez douce pour ne pas provoquer le moindre décentrement de

l'image lors de cette opération. On veillera aussi à ce qu'il puisse être rabattu instantanément, en cas d'arrêt accidentel du moteur d'entraînement par exemple.
Il est aussi indispensable que le coronographe soit placé sur une monture bien motorisée, stable, solide avec mouvements lents à la raquette. Si vous ne possédez pas une telle monture, sa construction ou son achat est un préalable indispensable!
On l'aura compris, l'observation avec cet instrument réclame toute l'attention de l'observateur. On évitera donc d'avoir un trop grand nombre de personnes autour de l'instrument.
Une alternative pour éviter tout risque est d'observer avec une webcam au foyer.

Les réglages

On a vu que les positions mutuelles des éléments peuvent être calculées théoriquement. Néanmoins, un réglage fin est toujours nécessaire.
Le premier réglage optique est réalisé sur un objet considéré à l'infini (montagne, clocher,...). Il s'agit de régler la position de l'ensemble lentille O2 + disque occulteur (réglable en translation par 3 tiges filetées).
Le but à atteindre est d'observer à l'oculaire une netteté parfaite et simultanée du disque occulteur et du paysage. Après chaque déplacement de la lentille O2, la mise au point de l'oculaire est bien sûr indispensable.
La seconde étape du réglage consiste à positionner le diaphragme au niveau de l'image de l'objectif O1 donnée par la lentille O2. Le plus simple pour cela est de découper une forme quelconque dans une feuille de bristol et la placer contre l'objectif; on place également une lampe devant O1 comme source de lumière. Le but est de régler la position du diaphragme pour que l'image du carton (en ombre chinoise) soit nette sur le diaphragme (placer un morceau de papier blanc sur le diaphragme pour observer l'image plus facilement).
Si la lentille O1 est un objectif achromatique comportant trois petites cales à 120°, celles-ci peuvent tenir lieu d'objet et leur image doit être nette au niveau du diaphragme. Si la lentille est sale (poussières ou trace de doigts), on verra nettement l'image de ces défauts se projeter sur le diaphragme.
La dernière étape consiste à amener le foyer objet de la lentille O3 sur l'image virtuelle du disque occulteur donnée par la lentille O2. Ceci a pour but de faire travailler le filtre interférentiel en lumière parallèle. On peut indifféremment procéder par calcul et mesures ou bien déplacer le bloc O3+filtre+O3' jusqu'à obtenir l'égalité des deux distances (O3-image virtuelle par O2) et (O3'-plan objet de l'oculaire).

Lors de la première observation du Soleil, il faudra choisir le bon disque occulteur: partir du plus grand et descendre en diamètre si nécessaire. Le réglage du diaphragme est destiné à obtenir le meilleur contraste et la meilleure définition: plus le ciel est parfait et coronal, plus il pourra être ouvert (sans dépasser une certaine limite toutefois). En revanche, le fermer trop fera perdre en définition (phénomène de diffraction devenant prépondérant).
Par ciel moyen, nous utilisons un rapport f/D résultant de 20 environ. Ce rapport se calcule en fonction de l'ouverture relative du diaphragme. Par expérience nous avons vu que nous changeons peu le diamètre de ce diaphragme et il peut éventuellement être remplacé par un diaphragme fixe.

Entretien et nettoyage des lentilles

Il s'agit de faire la chasse à la diffusion, et donc aux poussières. Les points les plus sensibles sont les lentilles O1 et O2. Un dépoussiérage régulier à l'aide d'une bombe de gaz neutre comprimé (magasins de matériel photo) est nécessaire. Ne jamais souffler sur une lentille, c'est le meilleur moyen d'y envoyer des postillons, même si l'on fait très attention. En cas de nécessité (souillure accidentelle) on pourra nettoyer l'objectif O1 à l'aide d'un tampon de coton très légèrement imbibé d'alcool. Pour les dépôts moindres, un pinceau très doux (martre) absolument propre fera l'affaire. Ne pas renouveler trop souvent les nettoyages, sources de micro-rayures, quoi que l'on fasse.
La lentille O2 peut être lavée à l'eau savonneuse douce (prévoir de pouvoir la démonter facilement) et séchée au gaz neutre.
La meilleure solution pour protéger le filtre est de l'enfermer par montage entre les lentilles O3 et O3'. Cette pièce coûteuse est ainsi définitivement protégée de toute agression extérieure.

Les observations au coronographe

Une fois le coronographe construit... il n'y a plus qu'à profiter de l'observation!... celle-ci peut aller de la simple observation visuelle à la réalisation d'animations de protubérances.

Observation Visuelle

Il faut bien l'avouer, l'observation visuelle reste la plus impressionnante! On ne se lasse pas de rester l'œil à l'oculaire, à saisir les petits détails et les lents changements des protubérances... un véritable émerveillement! Et lorsque le Soleil nous gratifie d'éruptions plus violentes, l'observation devient un grand spectacle!
On peut tout à fait réaliser des dessins des protubérances, néanmoins leurs évolutions, lentes mais constantes, rend l'exercice plus difficile: il faut être un dessinateur rapide!

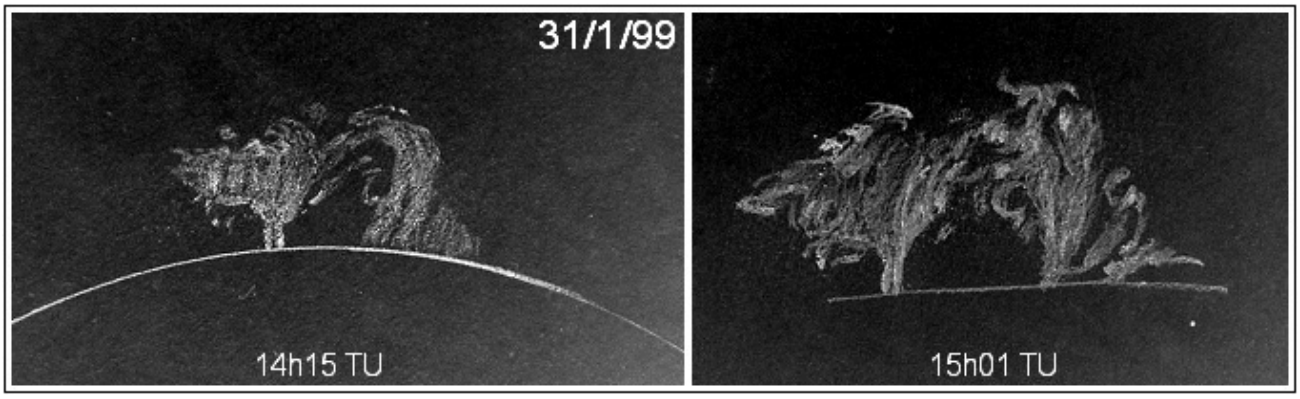

Figure 12 - Dessins au crayon (négatif), le 31 Janvier 1999

Sur la figure 12, on peut voir un dessin au crayon des protubérances solaires. Le dessin a été scanné puis passé en négatif, ce qui le rapproche de l'aspect du Soleil vu à l'oculaire.

Argentique

On peut aussi choisir de photographier le Soleil sur pellicule argentique: utiliser alors un appareil à visée reflex classique. La pellicule utilisée devra si possible avoir un grain fin: nous avons utilisé du Kodak TP2415 (négatif noir&blanc) ou du Kodachrome 25, 50 ou 100 (inversible couleur).
Le principal avantage est que l'on obtient une image du soleil entier sur le négatif 24 x 36mm.
En revanche, il est parfois difficile de trouver le bon temps de pose pour une bonne exposition. Egalement, le cadrage et la vérification continuelle du centrage obligent à pas mal de contorsions, et l'utilisation d'un déclencheur flexible est indispensable pour éviter les vibrations.

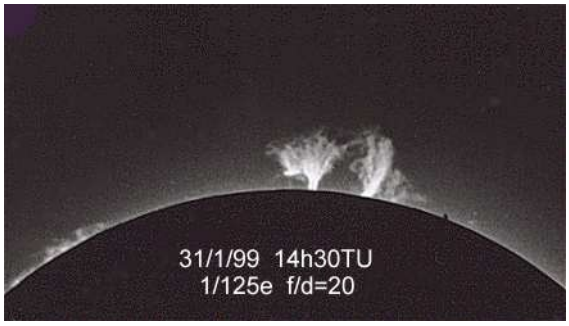

Figure 13 - Photo argentique sur Kodak TP2415, le 31 Janvier 1999 (à comparer avec le dessin de la figure 12)

Pour toutes ces raisons, nous nous sommes intéressés à l'utilisation de capteurs numériques.

Webcam et Numérique

L'utilisation d'une webcam pour enregistrer les phénomènes est sans aucun doute la manière la plus souple et sûre de réaliser de longues observations. Bien entendu, il faut disposer d'une webcam et d'un ordinateur!

Il est plus facile (mais non indispensable) de disposer de deux sorties optiques au coronographe:

- La première pour l'observation visuelle et le centrage de l'image.
- La deuxième pour la prise de vue à la webcam.

On utilise pour cela un petit cube diviseur 50%-50%. Sur la figure 14, on voit une photo de l'arrière du coronographe avec successivement:

- Une plaque de centrage du système, qui permet de bien s'aligner avec l'axe optique du coronographe.
- Un porte-oculaire à décentrement: une plaquette à vis permet de régler le désaxement et ainsi de pouvoir observer tout le pourtour du Soleil en le faisant simplement tourner. A noter que le système de mise au point ne fait pas tourner le système à décentrement.
- Le cube diviseur, qui sépare le faisceau vers l'oculaire (en haut) et la webcam (dans l'axe).

Figure 14 - porte-oculaire décentré et cube diviseur

La webcam peut fournir des images de 320 x 240 ou 640 x 480 pixels. Il est aussi tout à fait pensable d'utiliser un appareil photo numérique qui permettra d'atteindre des résolutions supérieures, ou bien une caméra CCD d'astronomie amateur munie d'un obturateur rapide.

Les films d'évolutions

Après avoir fait des images fixes à la webcam, il était très tentant de faire des animations montrant l'évolution des protubérances durant plusieurs heures consécutives, comme on peut en voir par exemple dans le film "Flammes du Soleil" qui montre les animations réalisées par Bernard Lyot au cours de ses années d'observation au Pic du Midi.
La procédure est assez simple avec une webcam: de nombreux outils sont disponibles, mais nous utilisons simplement le logiciel VidCap32 (gratuit et fourni par Microsoft). Il permet de concevoir un film image par image: on peut capturer les images successives de manière manuelle, au rythme souhaité. Généralement, nous faisons une image toutes les 10 à 20 secondes. Après quelques tests d'automatisation de la prise de vue, nous avons préféré garder le déclenchement manuel afin d'avoir un centrage optimal du disque occulteur et d'éviter de saisir les éventuels passages de nuages.
Le film vidéo résultant (au format .AVI) peut ensuite être retraité, compressé, etc...

Images

Voici quelques images prises à la webcam, certaines montrant des évolutions de protubérances au cours du temps.

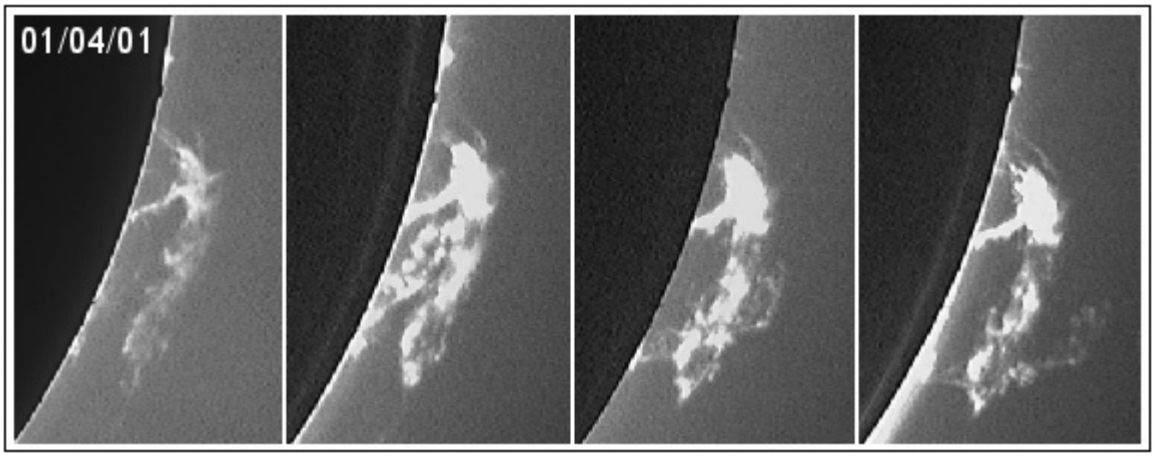

Figure 15 - Série de 4 images du 01/04/2001: on y remarque une protubérance immobile, derrière laquelle un "bras" de matière s'élève (l'animation d'origine mettant mieux en évidence le mouvement).

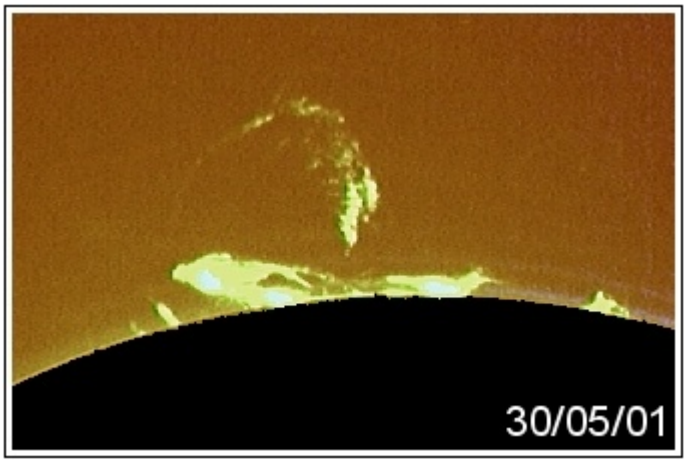

Figure 16 - Matière en suspension au dessus de la surface solaire. Sur l'animation d'origine, on voit les paquets de matière retomber lentement vers la surface.

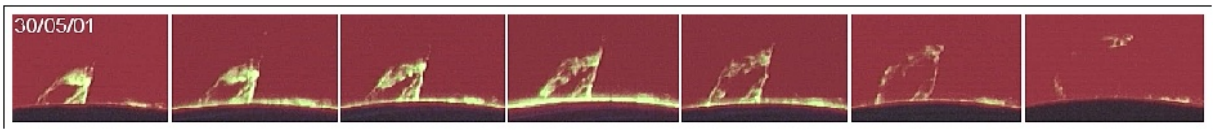

Figure 17 - Série de 7 images montrant l'évolution rapide (quelques minutes) d'une protubérance éruptive, avec élévation d'une arche qui se dilue finalement.

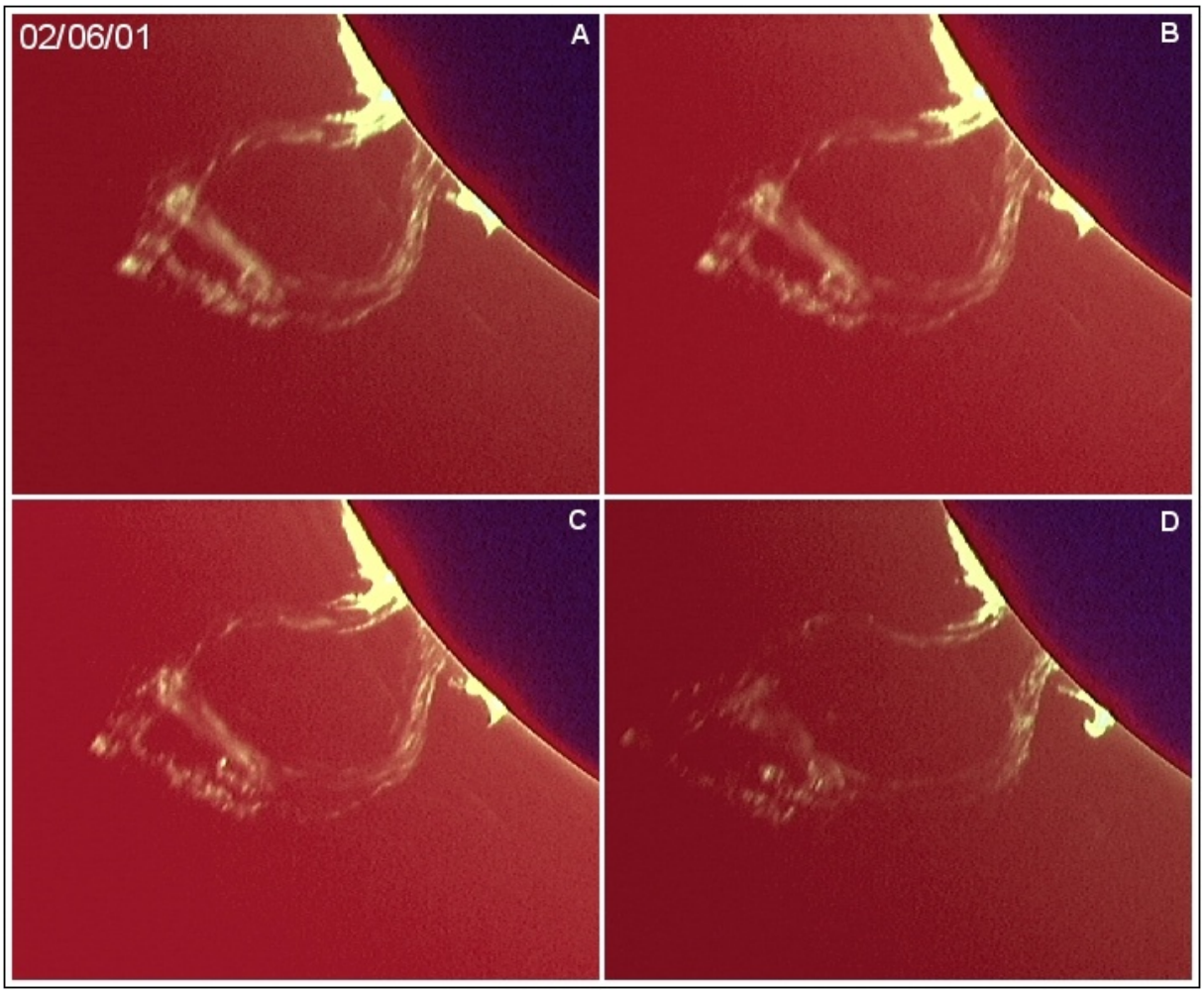

Figure 18 - Série de 4 images du 2 Juin 2001: une énorme protubérance éruptive déploie une arche à plus de 350000km au dessus de la surface solaire! Les dernières images de l'animation ont montré la présence de matière à près de 600000km de la surface.

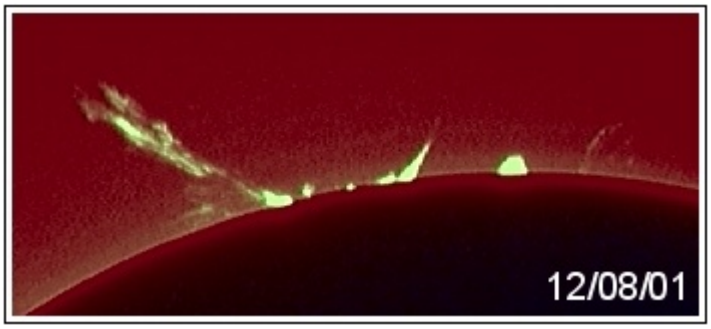

Figure 19 - Le 12 Août 2001, un jet de matière en déplacement rapide. L'animation d'origine montre deux aller-retour successifs de ce jet éruptif.

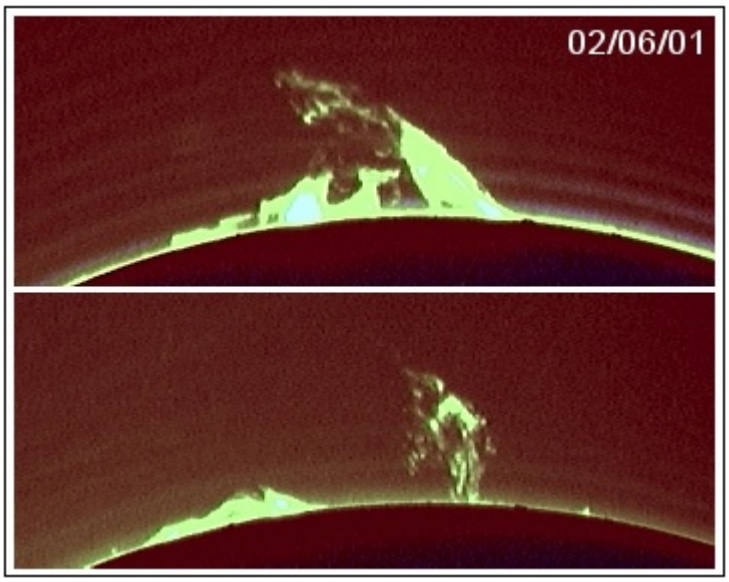

Figure 20 - Le même jour (2 Juin 2001), une autre éruption avec élévation puis retombée de matière.

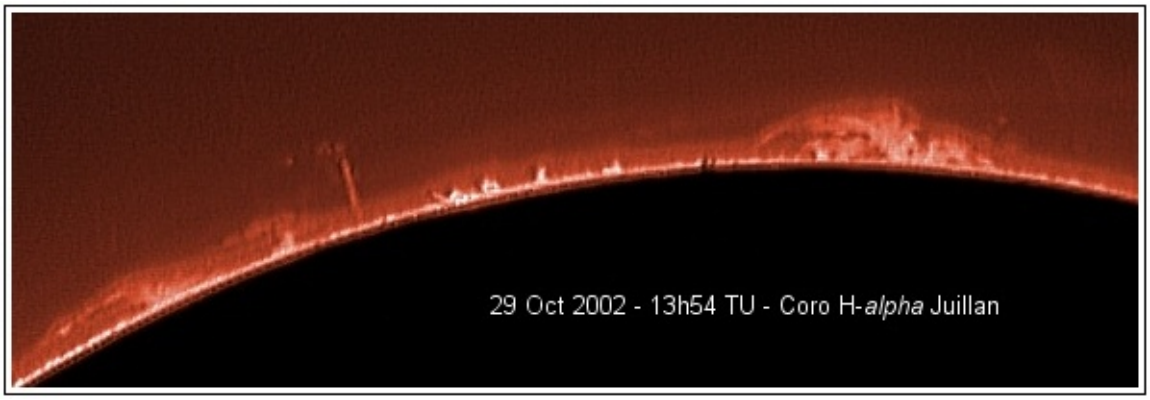

Figure 21 - Le 29 Octobre 2002 - essai de compositage et traitement d'une image à plus haute résolution, afin de saisir les petits jets proches de la surface.

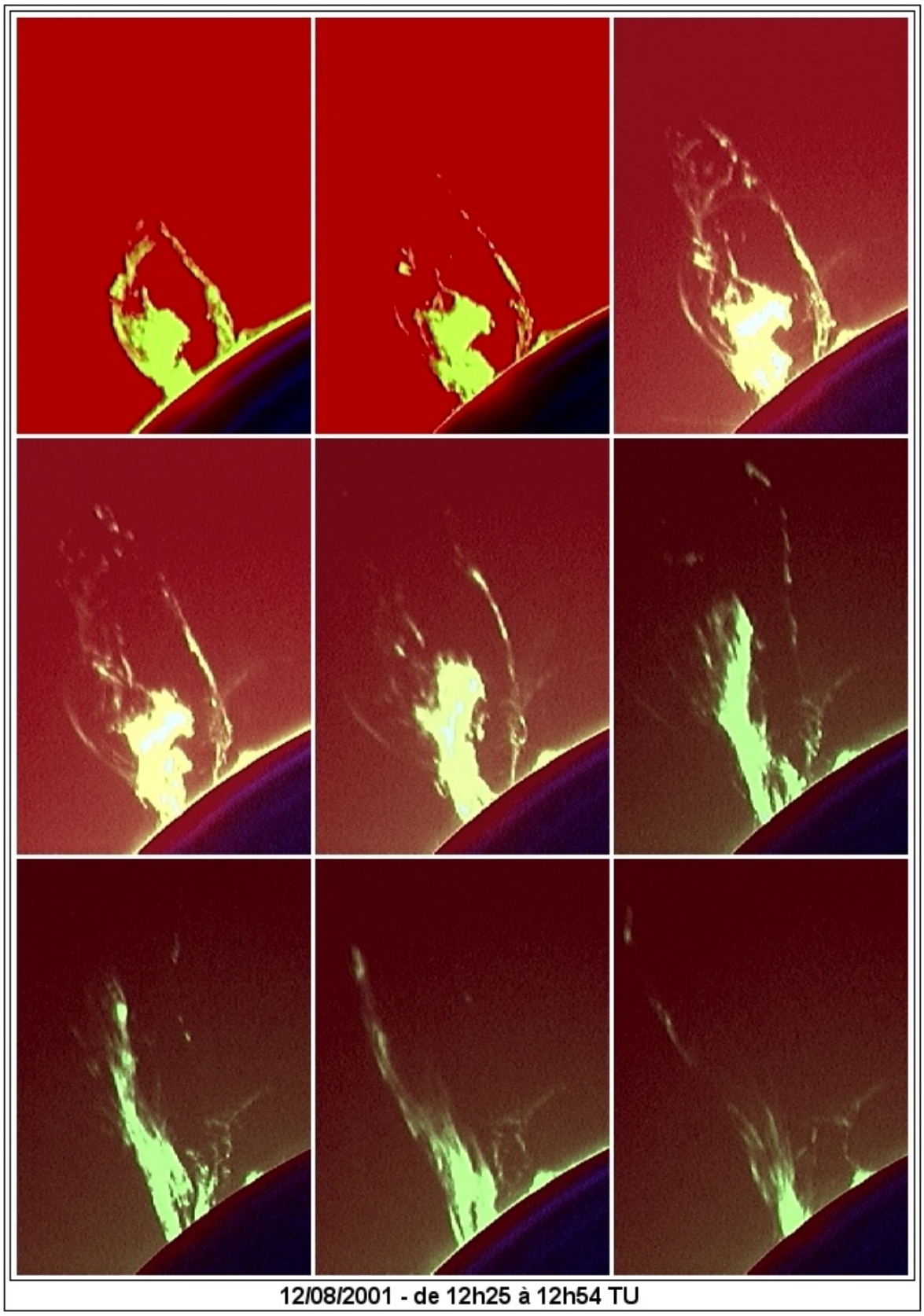

Figure 22 - Série de 9 images du 12 Août 2001: une protubérance impressionnante par son extension et sa rapidité! Le début du phénomène n'a malheureusement pas pu être enregistré. En revanche, 305 images ont été prises à cadence rapide (10 images / minute). Les différences de teinte et de luminosité s'expliquent par des réglages différents de la webcam, en rapport avec la luminosité de la protubérance: dans de tels moments, il est difficile d'être assez rapide pour à la fois régler la caméra et tenir une cadence de prise de vue élevée (la priorité étant consacrée à cette dernière).

Annexes

Voici quelques indications non exhaustives d'articles et ouvrages papier, ainsi que des liens vers des sites Internet à propos de coronographes et de méthodes diverses d'observation de la couronne solaire.

Bibliographie

Dans les numéros de l'Astronomie, on peut citer en premier lieux les articles originaux de Bernard Lyot, dans les volumes suivants:

- Juin 1931 – "Etude de la couronne hors éclipse" – vol 45 – p248
- Juin 1932 – "Photographie de la couronne hors éclipse" – vol46 – p272
- Mai 1937 – "Quelques études de la couronne solaire et des protubérances en 1935" vol51 – p203

Ainsi que des articles décrivant les travaux et la vie de B.Lyot:

- Juillet-Août 1952 – L.d'AZAMBUJA "L'œuvre de Bernard Lyot"
- Mars 1983 – A.DOLLFUS "Bernard Lyot, l'invention du coronographe et l'étude de la couronne solaire"
- Juillet 1983 – A.DOLLFUS "Bernard Lyot et le coronographe"
- Janvier 1998 – M.GROS "Bernard Lyot"
- Décembre 2002 – G.LYOT, JL.LEROY, N.MEIN "Il y a 50 ans, Bernard Lyot..."

Puis les articles suivants:

- J-M ROQUES - "Un coronographe d'amateur"– L'Astronomie – Février 1961 – p67.
- Fr. COSTARD - "Construction d'un spectrocoronographe à protubérances"– L'Astronomie - Année 1985 – p295.
- E.PETTIT "The interference polarizing monochromator" Mt Wilson & Palomar Obs. - Amateur Telescope Making Book III - pp422-423.
- H.E.PAUL "Building a Birefringent Polarizing Monochromator for Solar Prominences" – Amateur Telescope Making Book III – pp376-412.

Enfin, les ouvrages et articles suivants:

- Le Guide de l'Observateur - Société d'Astronomie Populaire - Tome1
- Pierre BOURGE & Pascal MAZEREAU – "A la poursuite du Soleil" - Eyrolles 1985
- S.BERTORELLO - revue Eclipse n°15
- A&S.RONDI - revue Pulsar n°736

Ressources web

<u>Amateurs:</u>

Voici quelques pages présentant d'autres coronographes construits par des amateurs: de très bonnes idées diverses à explorer!

- **Serge Bertorello** - http://serge.bertorello.free.fr/corono/corono.html
- **Jean-François Coliac** - http://jfcoliac.free.fr/Astro/Corono/corono.html
- **Didier Favre** - http://favre.didier.free.fr/coro/coronographe.html
- **Ramiro Hernandez** - http://mx.geocities.com/rhernand2002/coro.html
- **David M. Groski** - http://imz064.ust.hk/new_page_8.htm
- **Patrick Sogorb** - http://astrosurf.com/sogorb/articles_bricolage/coro/coro.html
- **Claude Richard** – http://claude.richard.free.fr/Coronographe/Coronographe.html
- **André & Sylvain Rondi** – http://www.astrosurf.com/rondi/coro/ - rondi@wanadoo.fr
- Enfin, signalons la récente et excellente réalisation d'un amateur français, **Léonard Wolff**, qui a réalisé entièrement son coronographe, en taillant toutes les optiques (lentilles simples)!

Professionnels:

- **Coronographe du Pic du Midi** - http://bass2000.bagn.obs-mip.fr
  Cette page recense les images prises au coro du Pic. Chaque jour, quelques images caractéristiques sont mises en ligne. Incontournable pour voir l'évolution en direct! (cliquer sur "Observations Systématiques").
- **Coronographe du Pic du Midi & Observateurs Associés** - http://www.astrosurf.com/oa - Programme de surveillance de la couronne solaire de l'Observatoire du Pic du Midi et collaboration avec les amateurs.
- **SOHO** - http://sohowww.nascom.nasa.gov/ - Le satellite de l'ESA et de la NASA - observation en continu du Soleil notamment avec le coronographe LASCO - images en direct.
- **Norikura Solar Observatory** - http://solarwww.mtk.nao.ac.jp/en/norikura.html
- **National Solar Observatory** - Sacramento Peak http://www.sunspot.noao.edu/
- **Mauna Loa Solar Observatory** - http://mlso.hao.ucar.edu/cgi-bin/mlso_homepage.cgi - Très intéressant site puisqu'il présente des vues récentes de la couronne et de la surface.
- **Mees Solar Observatory** - http://www.solar.ifa.hawaii.edu/mees.html