

# Imagerie solaire avec filtres à bandes étroites et avec la raie K du Calcium II :

## *Partie 1- Aspects instrumentaux et méthodologiques*

par

Christian Viladrich<sup>1</sup> et Serge Koutchmy<sup>2</sup>

### Introduction

L'activité de notre étoile Soleil a repris et de nouvelles missions spatiales sont en place pour une surveillance permanente de ses caprices et autres sursauts dans sa couronne et sa chromosphère. L'influence de l'activité solaire sur la météorologie de l'espace, et de manière encore plus sensible pour l'homme, sur le magnétisme terrestre et la biosphère, ainsi que son rôle sur les changements climatiques pour lesquels nous sommes tellement soucieux aujourd'hui, sont chaudement discutés par les médias, non sans raisons.

**Tout commence évidemment à la surface du Soleil** où phénomènes convectifs thermiques et magnétiques sont imbriqués, depuis **les plus petites échelles** si difficile à résoudre à cause du « seeing », jusqu'aux grandes échelles qu'il faut appréhender en examinant le **Soleil entier** avec soin. Les technologies de l'**imagerie solaire** ont grandement évolué ces dernières années, y compris dans le domaine de la **détection et du traitement informatique** ainsi que dans le domaine du filtrage **des rayonnements** intéressants à étudier. L'étude du Soleil est très spécifique car aucun autre astre ne fournit autant de photons à l'amateur (10 millions de fois plus que tous les autres astres pris ensemble !) et aucun autre astre ne se dévoile avec **autant de détails et autant d'inconstance**. Une aubaine pour l'observateur passionné par ce qui se passe dans le ciel, en plein jour, et qui pourra consacrer par ailleurs ses nuits claires à des occupations plus académiques ou ...au traitement informatique de ses images. Il est donc intéressant de faire le point sur toutes ces nouvelles méthodes, dans une 1<sup>ère</sup> partie, et discuter des interprétations plus théoriques de ces observations, dans le contexte des recherches les plus récentes, dans une 2<sup>ème</sup> partie, en prenant en ligne de compte les formidables avancées apportées par les missions spatiales, sans pour autant laisser se déchaîner l'arsenal des appareils scientifiques qui permet aujourd'hui de publier près d'un millier d'articles chaque mois sur ces sujets dans les revues internationales.

### Des nouveaux filtres solaires pour les amateurs :

Pendant très longtemps les seuls filtres<sup>3</sup> disponibles aux amateurs pour l'observation de la chromosphère étaient les filtres Daystar H . Depuis, de nouveaux fabricants sont arrivés sur le marché. Coronado d'abord, avec en particulier son PST qui, pour un investissement plus

---

<sup>1</sup> christian.viladrich@neuf.fr

<sup>2</sup> Institut d'Astrophysique de Paris, UMR 7095, CNRS & UPMC, koutchmy@iap.fr

<sup>3</sup> Nous ne parlerons pas ici du filtre de Lyot qu'il est devenu impossible de confectionner aujourd'hui, tant les cristaux bi-réfringents sont devenus rares à trouver, en dimension intéressante, et qu'ils sont chers à tailler et à monter...

accessible, permet d'accéder aux "flammes du soleil". Puis, plus récemment LUNT et Solarscope.

Ce premier article se propose donc de présenter quelques techniques d'imagerie du soleil dans le proche UV, qui est moins connu des amateurs que le  $\text{H}\alpha$ , avec le filtre Ca K (qu'il serait plus correct de dénommer Ca II K, car il s'agit d'une des deux raies de résonance du *calcium ionisé une fois, l'autre raie UV du même ion étant la raie H*) et le filtre Baader K-line.

La deuxième partie de l'article s'intéressera à la physique solaire sous-jacente, l'interprétation des images, et les domaines dans lesquels la contribution des amateurs est encouragée.

### **Les filtres disponibles pour l'observation de la chromosphère :**

Il existe un certain nombre de filtres disponibles sur le marché pour l'observation de la chromosphère. Leur caractéristique principale est malheureusement leur prix assez élevé qui se justifie par l'étroitesse de leur bande passante.

#### Les filtres \_\_\_\_\_ :

On citera par exemple, les filtres Coronado<sup>4</sup>, Daystar, Solarspectrum, et plus récemment Lunt ou Solarscope.

Ces filtres ont des bandes passantes plus ou moins larges, entre 0.8 à 0.3 Å selon les marques et les modèles. Ils sont assez chers, jusqu'à 10 k€ voire au-delà pour les bandes passantes les plus serrées et / ou les diamètres les plus grands. La durée de vie des filtres de conception récente (Coronado, Lunt) n'est pas encore bien connue.

Les filtres Daystar sont garantis 10 ans. Les versions H $\alpha$  comportent deux éléments optiques qui vieillissent (le "blocker" et le "trimmer") et qui peuvent être à remplacer au delà de 10 ans.

#### Les filtres Ca II K (393.38 nm):

Il existe finalement assez peu de filtres Ca II K disponibles dans le domaine amateur, on trouve :

- Daystar, qui produit des filtres Ca II K simple cavité (0.5 nm de bande passante, non régulés en température), ainsi que des double cavités (0.2 nm de bande passante) régulés en température. Notre expérience de ce filtre est qu'il se met à dériver irrémédiablement au bout de quelques années, vers le violet, sans espoir de pouvoir compenser cette dérive avec la température du four dans lequel il est enfermé.
- Solar Spectrum, qui semble pouvoir fournir des filtres Ca II K sur demande.
- LUNT avec des filtres de 0.25 nm de bande passante.
- Coronado de son côté semble avoir arrêté la production de ce type de filtres.

#### Les autres raies :

On peut trouver chez Daystar d'autres filtres comme Sodium D (589.5 nm), Helium D3 et Calcium H (396.9 nm).

La figure 1 montre l'apparence du disque solaire dans différentes raies:

---

<sup>4</sup> Voir, à ce propos l'article consacré par C. Bazin et S. Koutchmy dans le numéro 74 (2009) d'Obs. et Travaux (SAF), article disponible en .pdf sur demande aux auteurs.

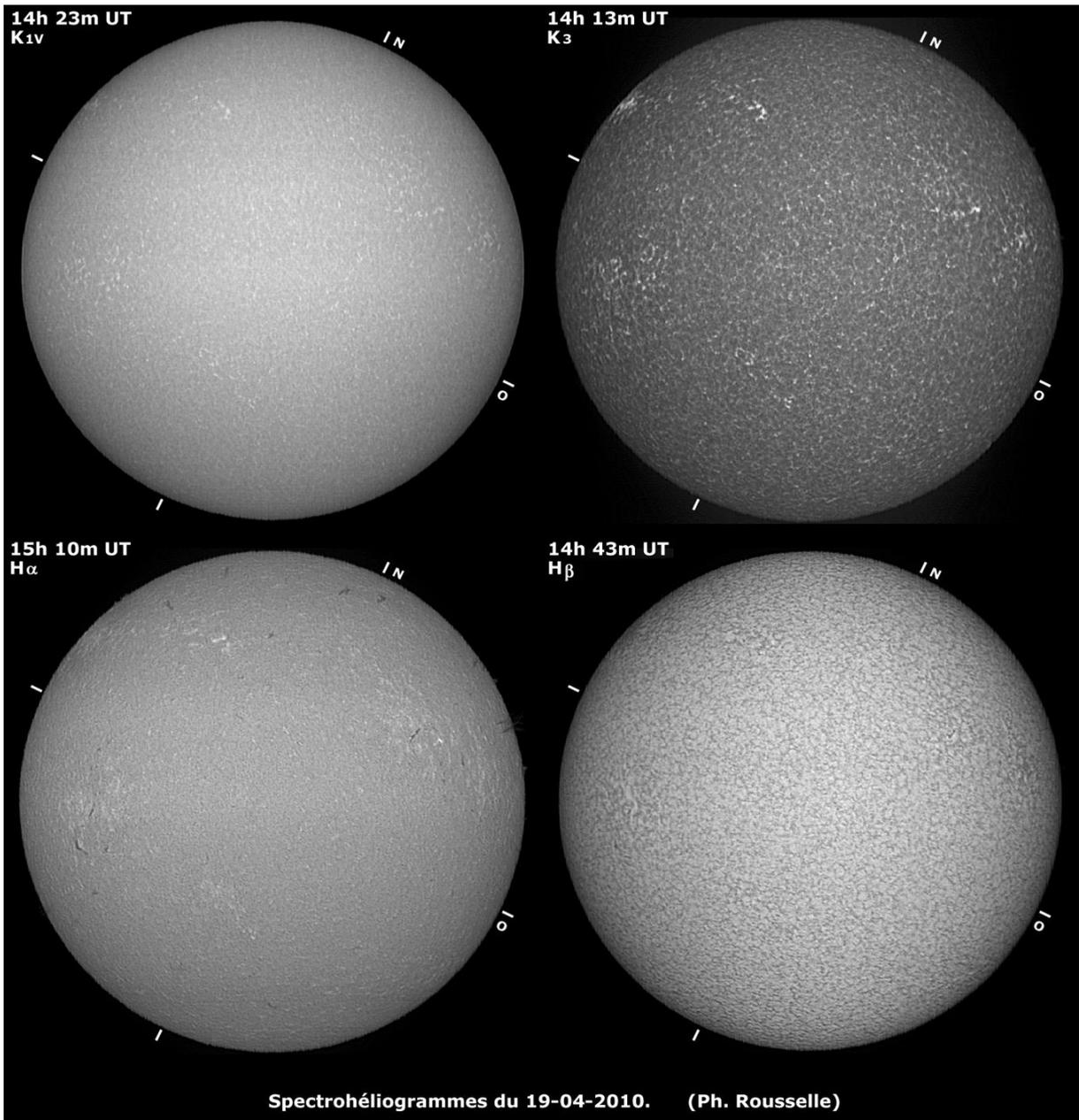


Fig 1 : Spectrohéliogrammes de P. Rousselle K<sub>1v</sub>, K<sub>3</sub>, H<sub>α</sub>, H<sub>β</sub> du 19 avril 2010. K<sub>3</sub> correspond à une position centrale sur la raie; K<sub>1v</sub> correspond à une position dans l'aile violette de la raie (voir explications dans la 2<sup>ème</sup> partie à venir de l'article). La bande passante effective pour ces images est étroite, de l'ordre de 0.03 nm. Le traitement réalisé sur ces images est assez complexe : contraste local renforcé par filtre passe-haut, correction des défauts horizontaux et verticaux inhérents à l'instrument, "circularisation" des images, accentuation du contraste du disque et des protubérances en multipliant l'image par elle-même (voir <http://astrosurf.com/spectrohelio/traitement-shg.php>). Dans le cas présent, chaque image résulte de l'empilement de deux images.

**Le filtre Baader K line (396 nm FWHM = 10nm):**

Le filtre Baader K line est un cas particulier ... un peu à la limite de la publicité mensongère car il ne s'agit pas d'un filtre Ca II K. En fait, il s'agit d'un filtre UV à bande étroite englobant les raies H et K du Calcium. Sa bande passante est de l'ordre de 10 nm, ce qui est considérablement plus large que les 0.5 ou 0.2 nm d'un "vrai" filtre Ca II K.

Il n'en demeure pas moins que ce filtre K line est très intéressant car il permet d'accéder à un domaine spectral où le contraste est fortement modelé par le champ magnétique, tout en permettant de pratiquer l'imagerie rapide du fait de sa bande passante plus large.

Si on compare ce filtre au traditionnel filtre vert utilisé en imagerie solaire amateur, on peut relever deux avantages :

- Le contraste entre les granules et les inter granules est plus marqué car il augmente quand la longueur d'onde diminue comme le montre la Fig 2

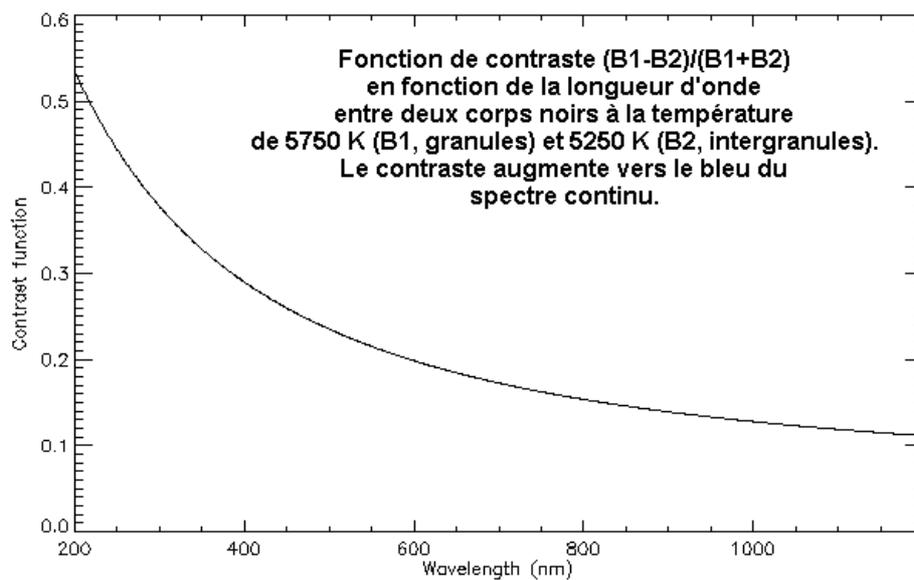


Fig 2 : *Contraste produit par la modulation due à la différence de la température entre granules et intergranules, en première approximation. Crédit J-M. Malherbe – Observatoire Pic du Midi et Paris-Meudon*

- Passer d'un filtre vert centré sur 550 nm à un filtre centré sur 400 nm permet de réduire le diamètre de la tâche de diffraction d'un facteur 1.4. Un instrument de 150 mm travaillant à 400 nm devient alors équivalent à un instrument de 200 mm travaillant dans le vert à 550 nm.

D'un autre côté, et c'est là l'aspect négatif, passer de 550 nm à 400 nm conduit à une augmentation de la turbulence (diminution du fameux paramètre de Fried  $r_0$  ou "longueur de cohérence transverse") de 25% du fait de la variation<sup>5</sup> de  $r_0$  en puissance 6/5 de la longueur d'onde.

On notera sur la courbe de transmission (Fig 3 et 4) que le filtre Baader K-line bloque très bien l'IR jusqu'à la limite de sensibilité des caméras numériques rapides (autour de 1000 nm). Il n'est donc pas nécessaire d'utiliser un filtre L ou anti-IR complémentaire (au contraire du filtre Baader continuum).

La face avant du filtre, qui est légèrement inclinée, est probablement celle qui bloque l'IR.

<sup>5</sup> Variation théorique pour une atmosphère de turbulence développée suivant la loi de Kolmogorov.



Fig 3 : Courbe de transmission du filtre Baader K-line (Crédit : Peter Höbel)

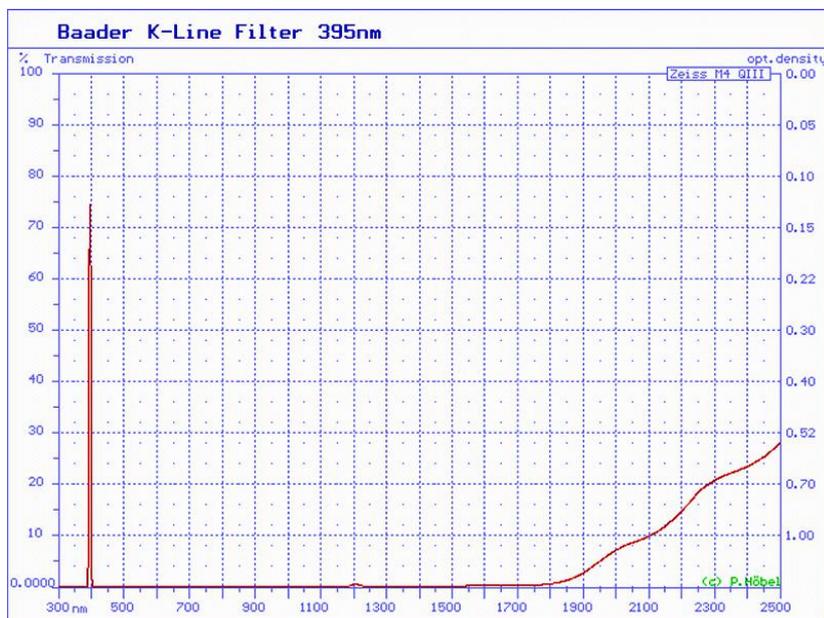


Fig 4 : Courbe de transmission du filtre Baader K-line dans l'infrarouge (Crédit : Peter Höbel)

Un autre filtre à bande étroite pour la photosphère, le filtre Continuum Baader (540 nm, FWHM=10nm) :

Baader propose aussi un autre filtre à bande étroite, assez connu des amateurs, le filtre "continuum" centré sur 540 nm (dans le vert). Ce filtre permet d'obtenir de bonnes images de la granulation, mais avec moins de contraste qu'avec le filtre K-line. On note sur la Figure 5 sa très bonne transmission (plus de 90 %).

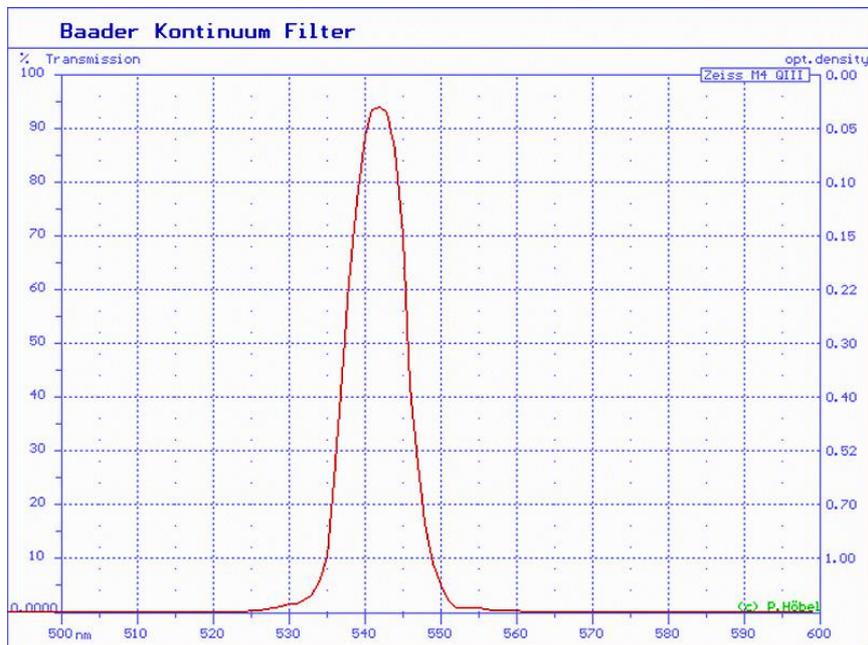


Fig 5 : Courbe de transmission du filtre Baader continuum - (Crédit : Peter Höbel)

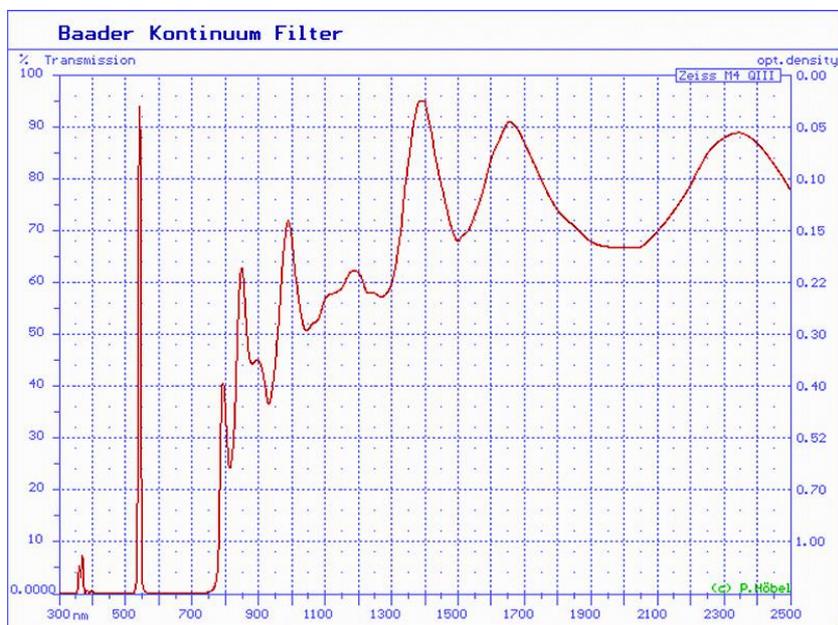


Fig 6 : Courbe de transmission du filtre Baader continuum dans l'infrarouge. La transmission devient supérieure à 40% au delà de 800 nm, ce qui rend préférable l'utilisation conjointe d'un filtre bloquant l'infrarouge (Crédit : Peter Höbel)

En revanche, le blocage dans l'IR est très loin d'être parfait, comme le montre la figure 6. Il est donc préférable de l'utiliser avec un filtre bloquant l'IR (filtre anti-IR, L ou V), notamment pour l'observation visuelle.

### Le soleil ... ça chauffe, les filtres de réjection :

Revenons aux filtres H et Ca II K. Certains filtres H, comme les Daystar et les Solar Spectrum, se placent devant l'oculaire. Ils doivent être utilisés en association avec un pré-filtre situé devant l'ouverture de l'instrument. Ces pré-filtres - appelés filtres ERF (pour Energy Rejection Filter) - ont pour objet de couper la majeure partie du flux thermique incident, essentiellement le bleu et le vert (il s'agit alors d'un simple filtre rouge comme le RG 610), et aussi quelque fois, selon la conception, l'infrarouge au-delà de 700 nm (par traitement multicouches) de façon à protéger d'avantage le filtre H (exemple Fig 7).

Si l'on revient aux filtres Ca II K, il y a deux approches en matière de filtres de réjection :

- Sur les filtres LUNT Ca II K, il semblerait qu'un pré-filtre anti-IR (en fait un "hot mirror" réfléchissant les IR et laissant passer le visible et l'UV) soit placé de façon légèrement incliné devant le filtre Ca II K proprement dit.



Fig 7 : Courbe de transmission du filtre ERF Baader – On constate le bon blocage de l'infrarouge proche. Le filtre ne redevient passant qu'au delà de 1.5 micron, dans l'IR thermique (Crédit : Peter Höbel)

- D'autres filtres comme les Daystars ou les Solar Spectrum sont livrés "seuls" et doivent encaisser la totalité du flux thermique capté par la lunette. Pour limiter les risques de casse dû à l'échauffement, Daystar recommande de ne pas utiliser ses filtres Ca K sur des lunettes de diamètres supérieurs à 70 mm. Au-delà de ce diamètre, il faut utiliser un pré-filtre.

Le problème, c'est que les filtres anti-IR, ou bien bleus, laissant passer le Ca II K (c'est à dire le proche UV) ne courent pas les rues. Et il est encore plus difficile d'en trouver en diamètre supérieur à 50 mm.

Pour les observations en Ca II K présentées ici, deux types de solutions ont été utilisées :

- pour l'imagerie du disque solaire dans son entier, l'ouverture de la lunette Takahashi TOA 150 est diaphragmée à 65 mm et un filtre L Astronomik a été ajouté devant le filtre Ca II K pour réduire la charge thermique,

- pour l'imagerie haute résolution en Ca II K, la lunette est utilisée à pleine ouverture (150 mm) et un hélioscope Hershell (coefficient de réflexion de l'ordre de 5%) permet de réduire le flux arrivant sur le filtre Ca II K.

On notera au passage que pour cette utilisation bon nombre de filtres bleus ne conviennent pas car ils coupent tout ou partie du flux à 393 nm. Le nouveau filtre Baader bleu (Fig 8) est une exception avec une transmission supérieure à 90% pour la raie Ca II K.

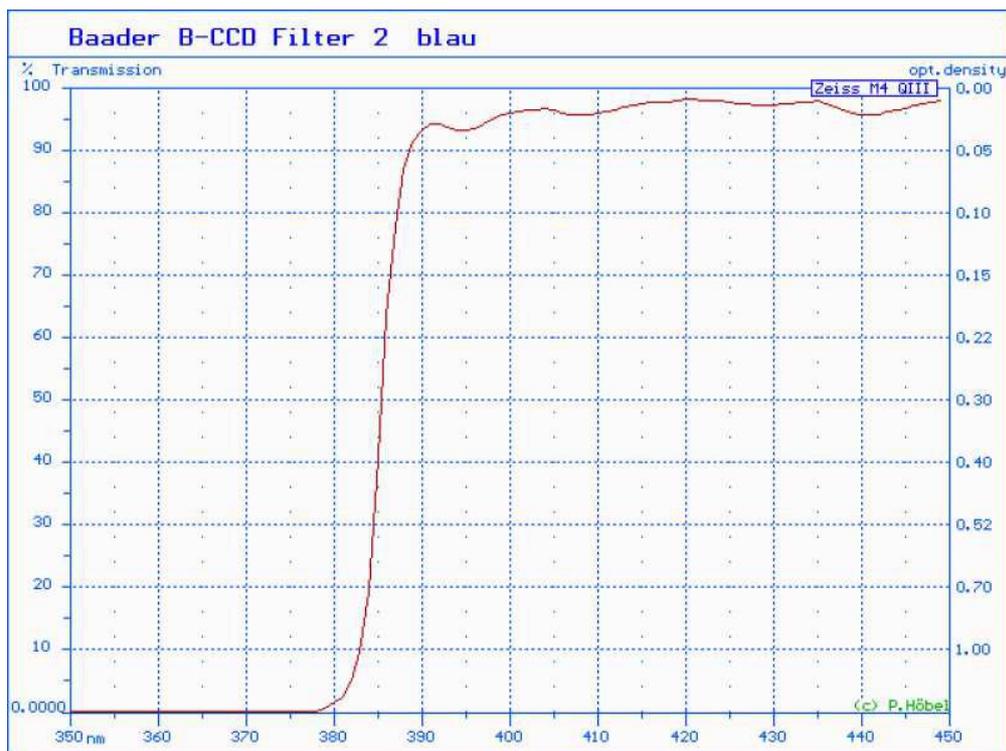


Fig 8 : Courbe de transmission du filtre bleu Baader – Ce filtre a une transmission supérieure à 90% pour la raie Ca II K (Crédit : Peter Höbel)

Le montage idéal pour le Ca II K serait un hélioscope dont la face réfléchissante serait traitée pour ne réfléchir que l'UV et le bleu, ou alors à l'inverse, un "hot mirror" qui réfléchirait l'IR, et si possible le vert et le rouge, pour ne laisser passer que le bleu et l'UV. Voici des idées pour les fabricants....

Il résulte de tout cela que les télescopes ne sont pas utilisables en Ca II K car il est quasi impossible de trouver des filtres de réjection ayant le diamètre approprié.

## L'imagerie en UV, la turbulence et l'aberration chromatique :

D'une façon générale, l'imagerie en Ca II K est nettement plus difficile qu'en H $\alpha$  ou lumière visible pour les raisons suivantes :

- La turbulence augmente nettement quand on passe du  $\alpha$  (dans le rouge), au continuum (dans le vert), et finalement au Ca II K (dans le proche UV). En effet, pour commencer le paramètre de Fried (le fameux  $r_0$  ou "longueur de cohérence transverse") qui mesure la qualité de l'atmosphère terrestre, varie théoriquement comme la puissance 6/5 de la longueur d'onde. Il y a donc au moins 1.8 fois plus de "turbulence" en Ca II K (393 nm) qu'en H $\alpha$  (656.2 nm), ce qui est effectivement loin d'être négligeable. Le paramètre de Fried ne tient évidemment pas compte des effets de lumière parasite due à la diffraction sur les aérosols et les micro-défauts des optiques (lumière diffusée). Par ailleurs c'est la surface « d'isoplanétisme »<sup>6</sup> qui est le paramètre intéressant pour les observations à grand champ.

- Du côté instrumental, la situation est aussi assez difficile car les réfracteurs ont en général de mauvaises performances dans l'UV - et ceci même si l'observation est faite en lumière monochromatique - du fait du sphérochromatisme, qui est une aberration en général moins connues des amateurs que l'aberration chromatique.

En deux mots, le chromatisme est le défaut par lequel la distance focale varie avec la longueur d'onde (le foyer bleu n'est pas à la même position que le foyer rouge).

Le sphérochromatisme est le défaut par lequel la distance focale, pour une longueur d'onde donnée, dépend de l'endroit par lequel le rayon lumineux traverse l'objectif : selon que les rayons arrivent par le centre ou sur les bords de l'objectif, ils vont se focaliser en un point différent. Il s'agit donc d'une aberration de sphéricité qui dépend de la longueur d'onde.

Lorsque l'on observe en Ca II K (ou en H $\alpha$ ) le chromatisme est nul puisque l'on observe en lumière monochromatique, mais en revanche l'aberration de sphéricité peut être assez marquée selon la conception de l'optique du réfracteur (Voir Fig 9 et 10).

Les constructeurs optimisent en général leurs optiques dans le vert, ce qui correspond au pic de sensibilité de l'œil. Ils essaient d'avoir une courbe la plus proche possible de la verticale pour cette couleur. La conception de l'objectif est en général optimisée pour que les courbes des différentes couleurs se coupent vers 70% - 80% de l'ouverture.

---

<sup>6</sup> La surface d'isoplanétisme indique l'étendue du champ sur laquelle l'étalement de l'image correspond au paramètre de Fried attribué. Cette surface est faible le plupart du temps, quelques arcsec. Cette information est peu crédible en fait, car il faudrait spécifier la localisation de cette surface au voisinage du foyer et la constante de temps associée, etc. Il faudrait d'ailleurs distinguer : agitation des images ; flou ; distorsion ; défauts non invariants par rotation, par décalage, etc..

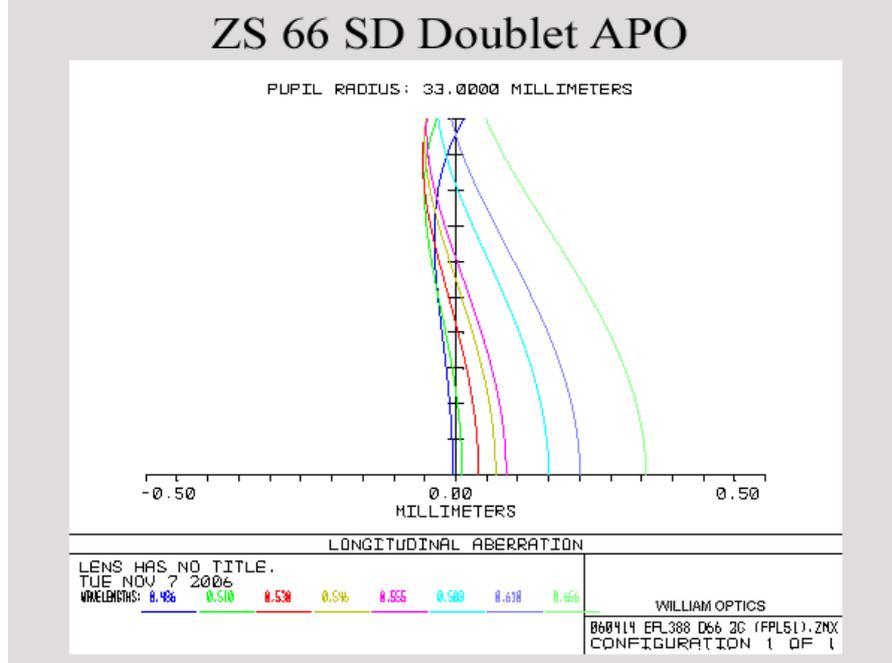


Fig 9 : Courbe de sphérochromatisme de la lunette Williams Optics ZS 66 (données site Williams Optics).

Les ordonnées représentent la position du rayon lumineux sur l'ouverture (par rapport à l'axe optique). L'ordonnée 0 correspond donc à des rayons lumineux passant par l'axe optique. L'abscisse donne l'écart de foyer le long de l'axe optique exprimé en mm.

Les différentes courbes ne sont pas superposées, ce qui signifie que la position du foyer dépend de la longueur d'onde. D'autre part, ces courbes ne sont pas des segments verticaux, ce qui signifie que la position du foyer dépend de la position du rayon lumineux sur l'axe optique (aberration de sphéricité).

Sur ce doublet SD, l'aberration de sphéricité est minimale dans le bleu et maximale dans le rouge.

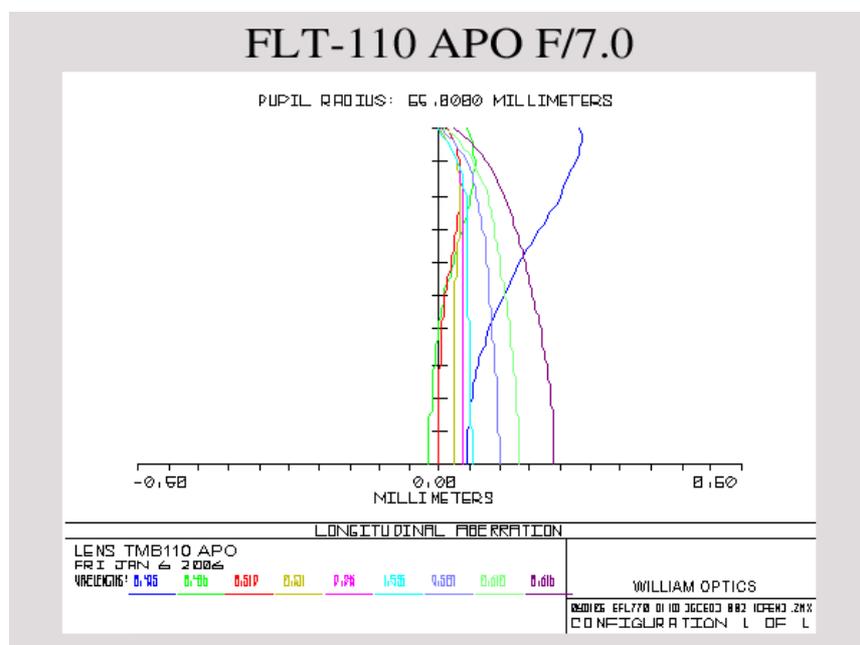


Fig 10 : Courbe de sphérochromatisme de la lunette Williams Optics FLT-110 (données site Williams Optics). Sur ce triplet APO, l'aberration de sphéricité se dégrade fortement dans le bleu. Les rayons bleu traversant le pourtour de l'objectif sont focalisés bien après ceux passant par le centre de l'objectif (écart de 0.3 mm environ).

La première lunette par l'un des auteurs (C. Viladrich) en imagerie Ca II K était une Vixen fluorite de 55 mm F/8 équipée d'un doublet (dont un élément en fluorite). Sa qualité dans l'UV s'est avérée nettement moins bonne que celle de la Takahashi FSQ106N F/5 (quadruplet Pezval modifié à deux lentilles fluorite) utilisée par la suite.

La Takahashi TOA-150 F/7 utilisée actuellement (triplet ortho-chromatique) est elle-même supérieure à la FSQ dans l'UV, ce qui est confirmé par les "spots diagrams" qui sont parfaits à 393 nm (Fig 11).



Fig 11 : Spot diagram de la lunette Takahashi TOA 150 avec correcteur de champ FL67 dans la longueur d'onde de Ca II K (Crédit Takahashi)

Bien évidemment, un télescope n'est pas affecté par le sphérochromatisme, mais malheureusement un télescope ne serait pas utilisable en Ca II K, du fait de la non disponibilité de filtre de réjection de diamètre suffisant compatible avec le Ca II K.

Le **bon côté** d'observer dans le proche l'UV, et il y en a heureusement un, c'est que le diamètre de la tache de diffraction étant inversement proportionnel à la longueur d'onde, il n'est pas besoin d'utiliser d'instrument de grand diamètre: un diamètre de 60 mm en Ca II K aura la même résolution théorique qu'un diamètre de 100 mm en H (1.2 arcsec dans les deux cas), un diamètre de 80 mm aura la résolution d'un 130 mm, et un diamètre de 150 mm en Ca II K sera équivalent à un 250 mm en H.

On pourra donc éventuellement diaphragmer le réfracteur (pour réduire le sphérochromatisme et aussi la charge thermique sur le filtre). Cet avantage est évidemment exploité dans l'espace où les fenêtres UV, EUV et X s'ouvrent grandement mais il faut alors mettre en œuvre des technologies très sophistiquées (nano-technologies), sans compter le coût d'aller observer sur orbite !

La suite de l'article précise l'instrumentation et les méthodes utilisées pour réaliser les images présentée ici.

## **Instrumentation utilisée pour les images du disque solaire avec filtre Ca II K :**

Pour les images du disque solaire, après avoir utilisé une Vixen 55mm F/8 Fluorite, puis une Takahashi FSQ-106, une Takahashi TOA 150 est utilisée avec un diaphragme de 65 mm placé devant l'objectif. Le diamètre de la TOA peut paraître luxueux étant donné la taille du diaphragme, mais comme indiqué plus haut, le gros avantage est la parfaite correction de l'optique à 393 nm.

La focale est portée à 2.1 m environ à l'aide de l'extender X1.5ED de Takahashi. Le filtre Ca II K (Barr Associates Inc, 393.38 nm FWHM= 0.3 nm) est installé entre l'extender et la camera CCD, une SBIG STL11000M. Il travaille donc à F/30 environ ce qui réduit d'autant le flux thermique. Un filtre Baader K-line placé devant le filtre Ca II K permet de couper l'IR.

L'échelle obtenue est de l'ordre de 0.9 seconde d'arc par pixel ce qui est un peu sous-échantillonné par rapport à la résolution théorique qui est de 1.2 secondes d'arc à cette longueur d'onde pour une ouverture de 65 mm.

Le gros intérêt de la STL 11000 M, au-delà des 4008 x 2672 pixels du KAI -11000, c'est la possibilité d'utiliser des temps de pose très courts (1 à 2 ms) grâce à l'obturateur électronique du capteur interligne, ce qui serait impossible avec un obturateur mécanique, et donc de geler la turbulence (ce qui ne veut pas dire la supprimer ...). La roue à filtre de la camera est laissée vide pour ne pas réduire la transmission dans l'UV.

La lunette est montée sur une Takahashi NJP 160 piloté par un boîtier de commande MCMT II. L'observation se fait depuis une terrasse orientée plein Sud. Des marques au sol permettent d'orienter correctement la monture par rapport au Nord céleste sans avoir à refaire une mise à station à chaque fois.

Il n'y a pas que les filtres qui peuvent chauffer au soleil, il y a aussi l'électronique de la CCD et les moteurs pas à pas de la monture. Des radiateurs sont donc installés sur les moteurs et l'intensité passant par les bobines des moteurs a été réduite (ce qui est possible avec le logiciel Prism / MCMT II). De cette façon, la température des moteurs reste raisonnable même en été. La camera CCD est protégée par un écran constitué par une feuille d'aluminium. Le refroidissement liquide serait possible, mais ce n'est vraiment pas pratique à utiliser.

Un PC portable, protégé du soleil par un carton, permet de faire le centrage du soleil et de dégrossir la mise au point. Ensuite, tout se passe à l'intérieur de la maison sur un PC fixe relié au PC portable par une liaison Ethernet 100 Mb/s. Le PC portable externe a donc essentiellement un rôle de relais vers le PC interne.

### **La mise au point :**

La mise au point sur le soleil avec une CCD n'est pas très facile car, au contraire d'une caméra vidéo, on ne voit pas l'image en continu mais seulement toutes les n secondes. La position de la

crémaillère de mise au point a été repérée à un mm près à l'aide d'un petit réglet métallique en fonction de la focale utilisée. Comme cela n'est bien sûr pas suffisant, la mise au point est ensuite affinée sur l'écran CRT 22" du PC fixe. Étant donné le temps de lecture de la STL 11000, environ 38 s, la mise au point se fait en fenêtrant sur une zone plus contrastée du disque solaire de façon à avoir un temps de lecture relativement court (quelques secondes).

Le principe est alors de prendre une série d'images en décalant progressivement la mise au point de façon à déterminer la meilleure position. Le logiciel Prism s'avère bien pratique pour cela, comme il permet de dupliquer facilement l'image acquise, on peut avoir à l'écran les différentes images obtenues pour chaque mise au point et trouver la meilleure position. Du fait de la turbulence importante en journée, 5 images tests sont faites pour chaque position de mise au point, seule la meilleure est conservée.

La position du système de mise au point est mesurée à l'aide d'un comparateur à cadran (Fig 12). La précision de la mise au point est de l'ordre de 0.05 à 0.10 mm environ, mais du fait de la variation importante de la température au cours d'une séance d'observation et des dilations associées, il faut refaire la mise au point toutes les 20 mn environ. Pour le moment, la mise au point n'est pas motorisée.



Fig 12 : Un comparateur à cadran au 1/100 de mm permet de faciliter la mise au point.

Le collier rotatif du système de mise au point permet d'orienter la camera selon les points cardinaux céleste.

### **Comment se déroule une séance d'acquisition :**

Une séance typique consiste en 150 à 300 images acquises avec la STL 11000M sur une durée de 2 à 3 heures selon la météo. Chaque séance est divisée en séquences de 30 à 40 images

lancée en série par Prism. La mise au point est contrôlée systématiquement à la fin de chaque séquence.

Sur le site utilisé, les meilleures conditions de turbulence sont observées lorsque le soleil se trouve entre 2 heures avant et 2 heures après le passage au méridien. Aucune bonne observation n'a pu être réalisée dans l'après midi, et très rarement quand le soleil est au dessous de l'équateur céleste. De l'herbe ou une pelouse sont favorables car leur présence évite un échauffement trop important du sol générateur de turbulence. Une très légère brise peut être favorable, du moment quelle vient de la bonne direction. Un vent trop fort dégrade le seing ...

Cela étant, chaque site est probablement spécifique et rien ne remplace l'expérience de l'observateur. D'une façon générale, avec un ciel dégagé, les images sont bonnes le matin avant le réchauffement qui excite la turbulence locale, avec un Soleil encore relativement bas, d'où un compromis à rechercher.

A noter que l'énorme atténuation atmosphérique vers 390 nm oblige à attendre que le Soleil soit suffisamment haut dans le ciel (au moins 20°) pour pouvoir observer en Ca K II.

### **Traitement des images du disque solaire en Ca II K :**

Les images sont ensuite triées automatiquement selon leur résolution par un petit programme écrit en IDL. Le critère de sélection est basé sur le rapport entre les hautes et basses fréquences du spectre de puissance.

Le rendement est assez mauvais, il faut de 200 à 300 images pour obtenir une "bonne" image du disque entier. Malgré cette sélection, la résolution est rarement correcte sur l'ensemble du disque solaire, ce qui serait le cas si la surface d'isoplaténisme atteignait ½ degré à l'instant précis de la prise de l'image ! Il y a bien souvent des zones où la turbulence (flou et distorsion) est plus marquée. Au contraire des images issues d'une caméra rapide, aucun compositage n'est possible étant donné la faible cadence d'acquisition de la STL11000M : non seulement les détails solaires de surface changent (convection) mais le Soleil tourne avec par exemple une vitesse relative de 2 km/s au voisinage du centre du disque.

Le traitement appliqué à la meilleure image est donc très simple : correction du dark et du flat, puis masque flou.

### **Instrumentation utilisée pour les images haute résolution avec filtres K-line et Ca II K:**

Sur ces images du disque entier, l'échantillonnage est de 0.8 à 0.9 secondes d'arc par pixel, ce qui est déjà supérieur aux images "synoptiques" obtenues par les observatoires professionnels au sol (souvent prises avec des capteurs 2 k x 2 k) et comparable à ce qui se fait de mieux dans l'espace (SDO).

Pour aller plus loin en résolution, il faut augmenter la focale et passer à des caméras rapides du type DMK ou Skynyx pour pouvoir faire de la sélection d'images / compositage comme on le fait en imagerie lunaire ou planétaire. Les images présentées ici (voir Photos) ont été réalisées avec une camera Skynyx 2.1 (1392x1040 pixels à 15 ims/s)

La prise d'images avec le filtre K-line ne posent pas de problème particulier si ce n'est la turbulence plus importante dans l'UV que dans le visible. La TOA 150 est utilisée à pleine ouverture, associée avec un hélioscope Baader, un FFC Baader pour augmenter la focale jusqu'à F/D 35 environ, soit environ 0.18"/pixel, ce qui permet des temps de pose de 0.5 à 2 ms selon la transparence du ciel et la hauteur du soleil.

Pour la prise d'images avec le filtre Ca II K, le montage est sensiblement identique, éventuellement avec une focale plus courte. Le filtre K-line sert alors de pré-filtre au filtre Ca II, pour bloquer l'IR. Le temps de pose est de l'ordre de 10 à 20 ms

### **Temps de pose, réglage du gain et nombre de bits avec la Skynyx 2.1 M:**

La camera Skynyx présente un certain nombre de paramètres de réglage, en particulier le gain et le nombre de bits en acquisition. Le temps de pose varie de façon inversement proportionnelle au gain. Le tableau suivant montre l'évolution de la dynamique en fonction du gain. On a tout intérêt à utiliser le gain le plus faible possible pour diminuer le bruit et profiter de la dynamique maximale.

Gain	Dynamique	Dynamique en dB	Dynamique en nombre de bits
1	1735	64.8	10.8
2.5	758	57.6	9.6
5	476	53.6	8.9
7.5	255	48.1	8.0
10	195	45.8	7.6
15	138	42.8	7.1
20	100	40.0	6.6
23.8	80	38.1	6.3

Du fait de la bande passante relativement large du filtre K-line (10 nm), on peut utiliser un gain de 1 en utilisant la bonne combinaison de filtres neutres. Le temps de pose est alors de l'ordre de la ms ce qui permet de "geler" la turbulence. Le tableau montre aussi qu'avec des gains inférieurs à 7.5, on a intérêt, du moins théoriquement, à faire des acquisitions en 12 bits. Il semblerait à l'expérience que cela soit effectivement le cas, mais cela reste à confirmer par davantage d'essais.

Avec le filtre Ca II K, le temps de pose devient nettement plus long du fait de la bande passante plus étroite, 0.38 nm au lieu de 10 nm, soit un facteur 30 environ. Les temps de pose obtenus sont de l'ordre de 10 ms avec un gain de 10. Le rapport F/D est choisi de façon à ne pas dépasser cette limite de 10 ms de façon à minimiser autant que possible les effets de la turbulence.

Il est à noter que le temps de pose dans le proche UV est beaucoup plus sensible à la hauteur du soleil et à la transparence du ciel que dans le vert ou le rouge.

### **Traitement des images haute résolution :**

Chaque acquisition dure typiquement 40s (au-delà, les détails du Soleil peuvent changer de forme) à 15 images/s. Une séance d'observation typique se déroule sur 2 à 5 heures selon la météo ce qui permet d'enregistrer entre vingt et soixante fichiers au format SER (soit jusqu'à 120 Go de données).

Le logiciel LucamRecorder est utilisé pour piloter les acquisitions avec la Skynyx, il permet de contrôler en temps réel la valeur maximale des pixels de façon à éviter toute saturation. La turbulence est surveillée en permanence à l'écran, les acquisitions étant lancées quand la turbulence devient plus faible. Lucam Recorder calcule en temps réel le contraste des images en temps réel ce qui donne aussi une bonne estimation de l'évolution de la qualité des images. Un des auteurs a d'ailleurs proposé au concepteur de LucamRecorder d'automatiser le démarrage des acquisitions sur la base d'un critère de contraste de façon à éviter d'avoir à surveiller en permanence la qualité des images à l'écran.

Le tri et un premier recentrage des images est fait de façon automatique à l'aide de scripts dans Iris de façon à identifier les meilleurs fichiers. Puis les meilleurs fichiers sont traités avec Avistack (correction de la distorsion atmosphérique et addition des meilleures images). Les additions sont réalisées systématiquement sur 20, 30, 45, 60 et 80 images, ce qui permet de sélectionner le meilleur résultat. En général entre 30 ou 60 images sont conservées sur un total de 600 acquises.

Avistack est actuellement le logiciel le plus performant pour le traitement des images du Soleil : la registration / morphing est faite sur un grand nombre de points (700 à 1000 points) déterminés automatiquement par le logiciel, l'addition ne considère que les meilleures sous-parties de chaque image, ce qui permet d'utiliser des images dont le champ de cohérence (= zone où l'image est nette) est plus petit que le champ de l'image.

On peut démarrer dans Avistack avec les réglages suivants :

Min distance = définition la taille des cellules de registration = 30 pixels (c'est la valeur maximale)

Quality area size = définition de la taille des cellules pour la mesure de la qualité = 128 pixels là aussi, c'est la valeur maximale).

Depuis la version 2, Avistack permet de traiter automatiquement un ensemble de fichiers ce qui est bien pratique lorsque l'on a 40 à 60 Go de fichiers à traiter.

L'image finale compositée est traitée par un masque flou pour augmenter le contraste local.

## Les perspectives d'évolution :

Pendant très longtemps, on pouvait lire que le diamètre optimal pour l'observation du soleil était de 100 mm, du fait du seeing de jour plus perturbé que la nuit. En fait, cela est devenu progressivement faux<sup>7</sup> avec d'une part le développement de l'imagerie rapide (10 à 50 images/s) avec les webcams, puis les cameras rapides de type DMK ou Skynyx, associée à des logiciels permettant de sélectionner les meilleures images d'une séquence et de corriger les décalages et la distorsion dans les images par **inter-corrélations** (correction «tip / tilt»). Ces méthodes sont appelées quelquefois « post-facto processing » et de nombreuses variantes existent.

<sup>7</sup> *Durant des décennies, des observations de routine du disque entier en Halpha ont été effectuées à l'Observatoire US de Sacramento Peak au Nouveau-Mexique (h=2800m). Pour obtenir une image « homogène » en qualité d'image, il a été suggéré de faire une pose relativement longue (plusieurs secondes de temps, à l'aide d'une monture asservie sur l'image du Soleil). Ainsi, l'image est à peu près uniformément mauvaise MAIS, le rapport signal/bruit est extrêmement élevé (longue intégration sur un film spécial sans grain). Cela permet de pousser très loin le traitement de l'image en augmentant considérablement les contrastes, genre filtrage des hautes fréquences spatiales c a d un traitement « shift-invariant ».*

*C'est probablement intéressant pour la photométrie à moyenne échelle (> 3 arcsec). Mais pour la haute résolution les détails sont définitivement perdus par les "longues" poses.*

D'autre part, la qualité des instruments et des composants mis à la disposition des amateurs ne cesse de s'améliorer.

Dans mon site d'observation, il m'est arrivé plus d'une fois d'être limité par le diamètre de la TOA 150 aussi bien avec le filtre continuum qu'avec le filtre K-line. Un diamètre de 200 à 250 mm serait clairement exploitable.

Le problème, c'est que dans ces diamètres là, il faut passer à des télescopes, ce qui rend impossible l'utilisation d'un hélioscope...

Notons que certains très bon résultats ont été obtenus par des amateurs avec des filtres à bande étroite dans le vert ou dans le rouge, sur des télescopes de la gamme de 200 à 300 mm de diamètre équipés de filtre pleine ouverture Astrosolar "photographique" de densité 3.8 (O. Grattepanche au TSC225 et filtre Baader Continuum de 10 nm, Maxim Usatov au C11 et filtre Baader Ha de 7 nm – Voir liens). Cette voie est certainement à explorer davantage.

Malheureusement, le filtre Astrosolar "photographique", même si sa densité redescend à 3 environ dans le proche UV (voir Fig 13), reste malgré tout un peu trop dense pour le filtre K-line étroit, les temps de pose commencent à devenir longs, et il est beaucoup trop sombre pour une utilisation avec un filtre Ca II K de 0.38 nm de bande passante. Un film Astrosolar de densité 2 serait le bien venu ...

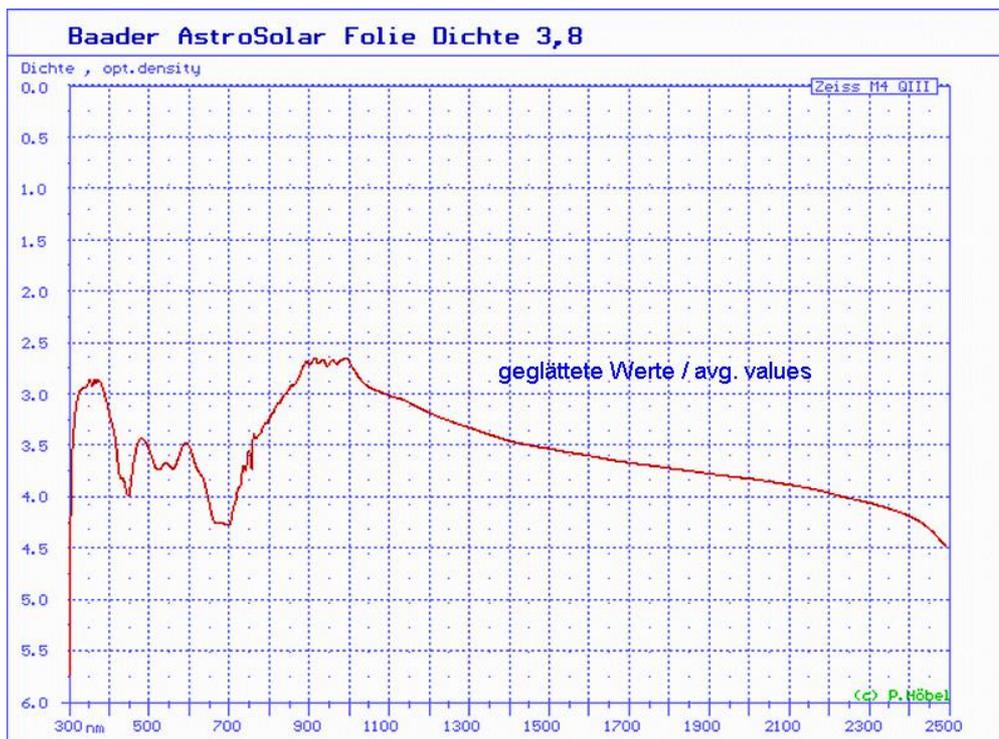


Fig 13 : Courbe de transmission du film Baader AstroSolar de densité 3.8 (Crédit : Peter Höbel)

Côté acquisition, des progrès sont en cours au niveau de la vitesse d'acquisition des caméras, comme par exemple chez Lumenera qui propose maintenant dans sa gamme un modèle avec liaison Giga-Ethernet, la LG255M, avec un capteur 1616x1216 pixels travaillant à 25 images/s, soit une cadence 2.5 fois plus élevée que la Skynyx 2.2M qui possède le même capteur, ce qui augmente d'autant la probabilité d'obtenir de bonnes images.

Toujours chez Lumenera, la Lw11057 avec son capteur 24 x 36 mm KAI-11000, soit 4008 x 2672 pixels, tourne à 3.5 images par seconde, ce qui est considérablement plus rapide que la

SBIG STL11000 dont la cadence est de d'une image toutes les 35 secondes. Cette Lw11057 commence à être utilisée par certains amateurs en France. Un nouveau modèle avec liaison Giga-E a été annoncé par Lumenera en début d'année 2010. Il devrait autoriser des cadences de 6 à 8 images/s. Ce sera une arme redoutable pour les images du disque solaire, que ce soit en Ca II K ou en H .

### **Interprétation et utilisation des images :**

La deuxième partie de l'article s'intéressera à la **physique solaire** sous-jacente, **l'interprétation** des images, et les domaines dans lesquels la **contribution des amateurs** est encouragée.

### **Références :**

Site du logiciel Avistack : <http://www.avistack.de/>  
Site de Olivier Grattepanche <http://www.astrographica.com>  
Site de Peter Höbel : <http://www.sonnen-filter.de/>  
Site du logiciel Lucam Recorder :  
<http://www.astrofactum.de/Astrofactum/LucamRecorder/index.htm>  
Site de Philippe Rousselle: <http://www.astrosurf.com/spectrohelio/>  
Site de Maxim Usatov <http://www.bcsatellite.net/bao/sun27jul.html>  
Site de Christian Viladrich : <http://astrosurf.com/viladrich/>

### **Photos soleil :**

**Photo 1 :** Disque entier Ca II K à la CCD

<http://astrosurf.com/viladrich/astro/soleil/2010/Cak-14march2010-11h31mnUT.jpg>

Takahashi TOA 150 diaphragmée à 60 mm – STL11000 M - 5 ms de pose – Filtre Ca K

**Photo 2 :** Haute résolution : K-line – granulation solaire – Skynyx 2.1M

<http://astrosurf.com/viladrich/astro/soleil/wl/2009/K-1August2009-8h35mnUT.jpg>

Takahashi TOA 150 – Hélioscope Baader, filtre Baader K-line – Skynyx 2.1 M – pose de 2 ms - addition de 20 images – traitement avec Avistack

ou bien :

<http://astrosurf.com/viladrich/astro/soleil/wl/2010/AR1072-24May2010-11h53mnUT-Kline-t2.jpg>

Takahashi TOA 150 – Hélioscope Baader, filtre Baader K-line – Skynyx 2.1 M – pose de 0.6 ms - addition de 30 images – traitement avec Avistack

**Photo 3 :** Haute résolution : HR : Ca II K – granulation solaire et région active- – Skynyx 2.1M

<http://astrosurf.com/viladrich/astro/soleil/wl/2009/Cak-1August2009-11h33mnUT-b.jpg>

Takahashi TOA 150 – Hélioscope Baader, filtre Ca K – Skynyx 2.1 M – pose de 6.6 ms - addition de 20 images – traitement avec Avistack

**Photo 4 :**

<http://astrosurf.com/viladrich/astro/soleil/wl/2009/Cak-1August2009-10h34mnUT-FFC.jpg>

Takahashi TOA 150 – Hélioscope Baader, filtre Ca K – Skynyx 2.1 M – pose de 20 ms -  
addition de 38 images – traitement avec Avistack