



Instrumentes solaires du site de Meudon: description et caractéristiques des instruments d'observation

Jean-Marie Malherbe

► To cite this version:

Jean-Marie Malherbe. Instrumentes solaires du site de Meudon: description et caractéristiques des instruments d'observation. 2013. hal-00785323v2

HAL Id: hal-00785323

<https://hal.science/hal-00785323v2>

Preprint submitted on 14 Feb 2013 (v2), last revised 24 Jun 2014 (v3)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Observatoire de Paris

Instruments solaires du site de Meudon

Description et caractéristiques des instruments d'observation Service d'Observation n°6 (SO6), 15 Février 2013

Jean-Marie Malherbe ()*

Historique: un siècle d'observations quotidiennes à Meudon 2

Instruments SO6

Spectrohéliographe de Meudon	7
Ancien Héliographe H alpha de Meudon, 656.3 nm "lambda variable"	13
Héliographe CaII raie H 396.8 nm	20
Héliographe CaII raie K 393.3 nm	26
Héliographe continu vert 530 nm	32
Héliographe bande G 430.7 nm	35
Tour Solaire, Lunette CaII raie K 393.3 nm	38
Tour Solaire, Lunette Halpha 656.3 nm	42
Tour Solaire, Lunette Continuum H K 385 nm	44

Instruments hors SO6

Tour Solaire, spectrographe classique en simple passage à fente fine	48
Tour Solaire, spectrographe à Double Passage Soustractif Multicanal	57
Tour Solaire, voie imagerie monochromatique (filtres)	63
Banc de calibration polarimétrique Tour Solaire	65

(*) les trois chapitres sur les lunettes Tour Solaire en collaboration avec Régis Le Cocquen

I - Cent ans d'observations solaires à Meudon

L'année 2009 a marqué le centenaire des observations journalières du Soleil à Meudon et nous a donné l'occasion de retracer l'histoire des observations solaires, à laquelle les astronomes français ont apporté une contribution majeure.

L'observation des taches à la lunette a débuté dès 1610 avec Galilée en Italie, Thomas Harriot en Angleterre, Johannes Fabricius en Hollande et le jésuite Christoph Scheiner en Allemagne. La fondation de l'Observatoire de Paris en 1667 sous Colbert a favorisé l'émergence d'instruments de précision (micromètre à fils d'Adrien Auzout, horloges de Christian Huygens) permettant de s'attaquer à des questions toujours débattues aujourd'hui comme la variation temporelle du diamètre solaire. Joseph von Fraunhofer, identifiant en 1817 les raies larges du spectre solaire, fut à l'origine d'une avancée décisive en spectroscopie. Léon Foucault et Hippolyte Fizeau, réalisant le premier daguerréotype du Soleil en 1845, ouvrirent la voie qui allait révolutionner l'astronomie.

L'éclipse totale du 18 Août 1868 voit triompher de façon éclatante la spectroscopie naissante: Jules Janssen et Norman Lockyer découvrent dans le spectre de la basse couronne une raie jaune (la raie D3 5876 Å); ils l'attribuent à un élément alors inconnu qu'ils baptisent Hélium. Le lendemain, ils réussissent à retrouver les protubérances aperçues au bord solaire, grâce à leur technique. L'année suivante, Thomas Young est intrigué lors de l'éclipse du 7 Août 1869 par une raie verte inattendue (5302 Å) et suggère encore un nouvel élément, le Coronium. Il ne faudra pas moins de 70 ans pour comprendre qu'il s'agit d'une raie « interdite » du Fer 13 fois ionisé, qui ne s'observe que dans les milieux très chauds (10^6K) et très dilués impossibles à reproduire en laboratoire ! Quelques années plus tard, en 1876, Jules Janssen fonde l'Observatoire de Meudon : c'est le début d'une grande moisson de clichés solaires, certains dans la fameuse raie G qui sera identifiée après comme une bande de la molécule CH (4305 Å). Janssen s'interroge alors sur la présence d'Oxygène dans l'atmosphère solaire, et échafaude un pari fou d'observatoire sur le sommet même du Mont Blanc dans le but de séparer la contribution atmosphérique de celle du Soleil. Pari tenu ! L'observatoire est inauguré en 1893 mais sera rapidement englouti par le glacier.

Au tournant du siècle, George Hale aux USA et Henri Deslandres en France mettent au point (indépendamment) le spectrohéliographe, appareil toujours en service au Grand Sidérostat à Meudon. Cet instrument à balayage spatial est dédié à l'observation monochromatique du Soleil ; il est à l'origine d'une collection de 10 cycles unique au monde (100 000 plaques) et constitue le pilier des observations systématiques depuis 1909. Il a bénéficié de l'impulsion considérable de Lucien d'Azambuja qui lança l'exploitation scientifique et la confection des cartes synoptiques.

Le bond suivant est dû à Bernard Lyot, qui invente le coronographe (1931) ; cet instrument a fait le tour du monde et sert à dévoiler la couronne solaire en réalisant une éclipse artificielle. Il l'exploitera au Pic du Midi pour la pureté de son ciel. Lyot jettera aussi les bases du filtre polarisant monochromatique qui porte son nom (1939), lui aussi largement utilisé de nos jours : la polarimétrie, dans la lignée de Lyot, devient ainsi une école meudonnaise d'excellence dont l'aboutissement sera le télescope THEMIS aux Canaries. Vers 1960, les coronomètres et autres lunettes polarimétriques des Charvin, Leroy, Dollfus, détectent d'ailleurs à Meudon même la couronne solaire dans la raie rouge « interdite » et étudient l'effet Zeeman sur les taches.

Dès 1956, Audoin Dollfus embarque un instrument dans la nacelle d'un ballon à 6000 m d'altitude pour observer la granulation solaire. En 1967, c'est le début de l'ère spatiale : Dollfus implique le CNES dans une observation coronale à 32 km d'altitude à l'aide d'un coronographe à occultation externe lancé d'Aire sur Adour.

A l'occasion de l'année géophysique internationale (1957), Raymond Michard décide la mise en chantier d'un grand spectrographe de 9 m, qui sera testé à Meudon puis transporté au Pic du Midi où il viendra compléter le petit spectro à éruptions de 4 m ; son exploitation basculera plus tard, au début des années 80, vers le spectrographe de 8 m construit par Zadig Mouradian sur la lunette tourelle, donnant de bien meilleures images à l'Est de la crête du Pic. Michard construit également à Meudon en 1962 le premier magnétographe pourvu d'un polarimètre à grille de Hale.

La Tour Solaire de Meudon, achevée vers 1970, et munie d'un spectrographe exceptionnel (14 m), permettra à Pierre Mein de mettre au point une technique originale et puissante de spectro-imagerie multicanale qui sera par la suite étendue à plusieurs télescopes, dont le Vacuum Tower Telescope allemand (1990) et THEMIS (1999) aux Canaries. Au même moment, Jean Rayrole met en chantier un nouveau magnétographe, au Grand Sidérost, composé d'un télescope Newton de 40 cm, d'un spectrographe de 8 m et d'un polarimètre innovant à deux voies simultanées ; polarimétrie et spectroscopie s'y marient en synthétisant le meilleur du savoir faire meudonnais que l'on retrouvera 25 ans après dans THEMIS sous sa forme la plus achevée. C'est aussi à cette époque que Dollfus développe au télescope de 1 m un dispositif d'imagerie spectrale à analyse de polarisation.

Nous arrivons au terme de cette riche épopée dont l'apogée est derrière nous et entrons dans l'ère du projet EST de grand télescope solaire européen prévu pour 2020 aux Canaries.

En parallèle, l'observation spatiale s'est considérablement développée ouvrant aux astronomes l'accès aux domaines Gamma, X, UV: citons les instruments SOHO (1996), TRACE (1999), RHESSI, STEREO (2006), HINODE (2006), SDO (2010)... et ceux du futur (2020), qui approcheront le Soleil, comme SOLAR ORBITER ou SOLAR PROBE.

Quels sont les instruments encore en fonctionnement à Meudon ? Ce document décrit à l'attention des utilisateurs scientifiques potentiels des données produites les instruments solaires en activité occasionnelle ou permanente, comme ceux de surveillance de l'activité solaire du Service d'Observation SO6 de l'INSU.

Pour en savoir plus : « les observations optiques du Soleil à Meudon, histoire et développements instrumentaux », mémoire du Diplôme d'Université « Structuration de l'Univers », par Régis Lecocguen, Septembre 2008, disponible en pdf sur:

http://solaire.obspm.fr/images/documentation/Histoire_des_observations_solaires_Meudon.pdf

et

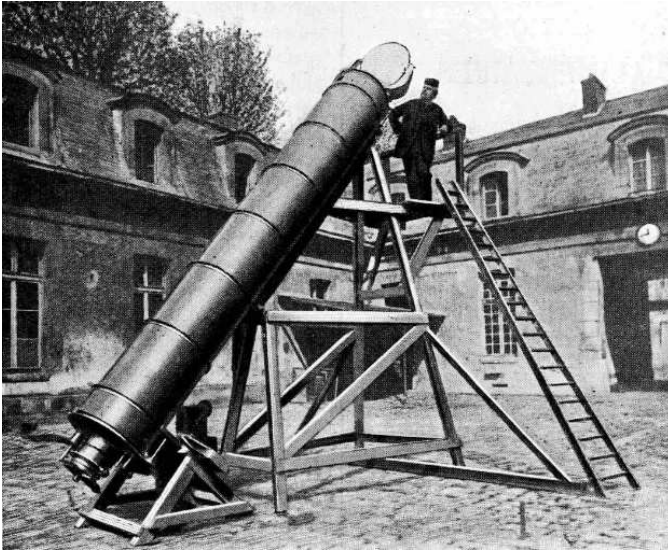
le site des observateurs <http://solaire.obspm.fr/>

la base de données solaires BASS2000 <http://bass2000.obspm.fr/>

Quelques illustrations inédites



Lunettes solaires de Janssen vers 1878 à Meudon © Obs Paris



La grande lunette du Mont Blanc équipée d'un sidérostât polaire dans la cour des Communs à Meudon avant son transport en segments (à dos d'homme !) sur le site, vers 1895 © Obs Paris

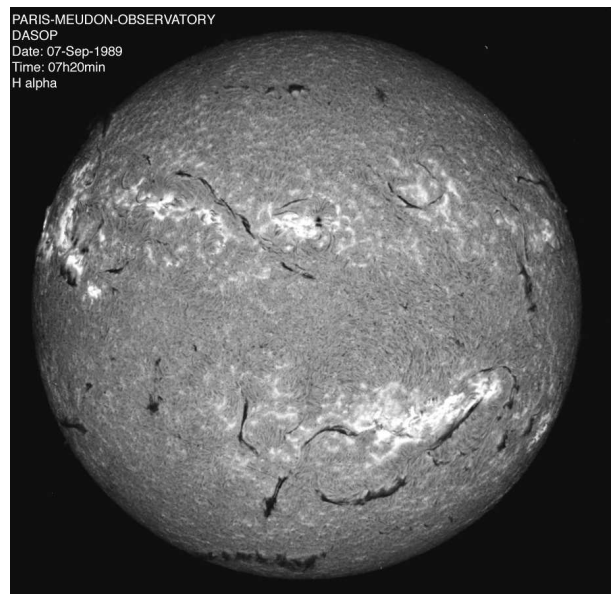


L'éphémère Observatoire du Mont Blanc dura 15 ans ; il fut conçu et érigé à Meudon avant son transport en pièces détachées (des centaines de charges de porteurs !). La lunette de 12 pieds, dont l'axe devait garder une orientation fixe alignée sur l'axe du Monde, y fut montée en sidérostât polaire. Janssen l'inaugura l'Observatoire en 1893 lors de sa seconde ascension © Obs Paris

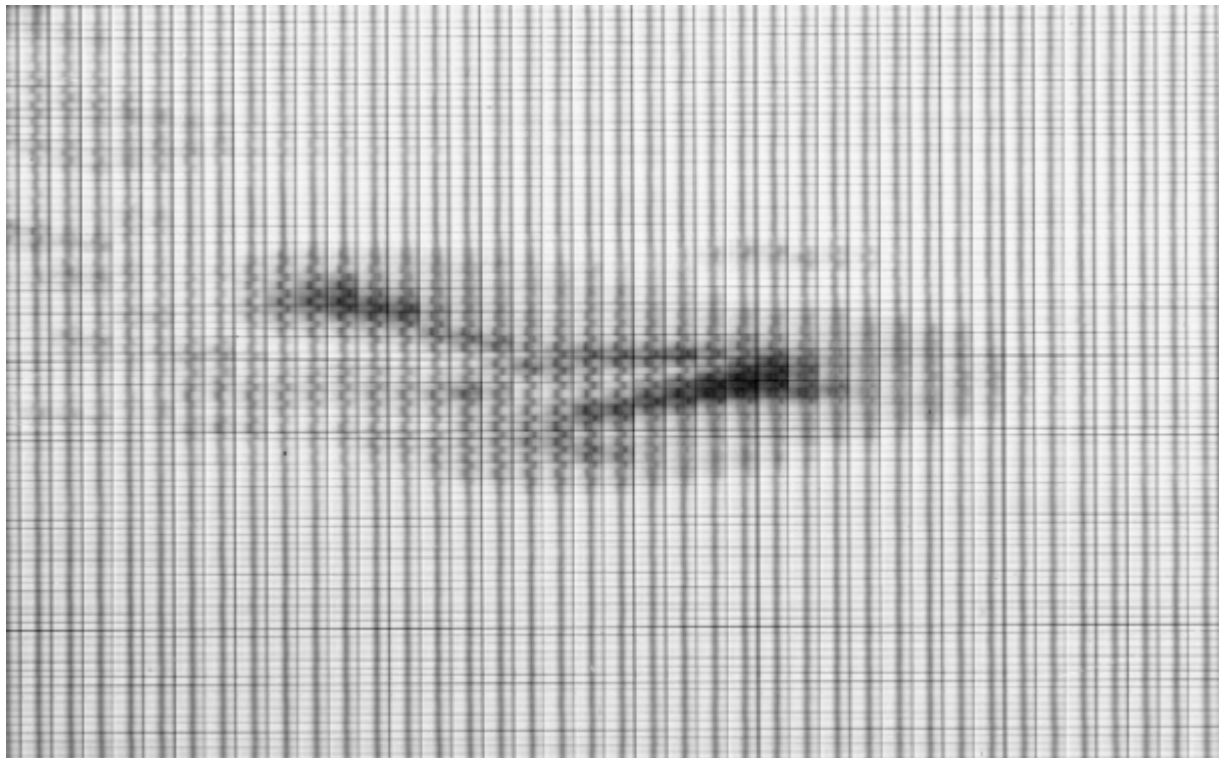


**Henri
Deslandres**
© Obs Paris

*Exemple de cliché solaire obtenu quotidiennement à Meudon (la chromosphère dans la raie H α) et issu de la collection centenaire du spectrohéliographe de Deslandres
© Obs Paris*



*Le télescope
THEMIS de
l'INSU est
l'aboutissement le
plus sophistiqué
d'un siècle
d'instrumentation
solaire à Meudon
© Obs Paris*



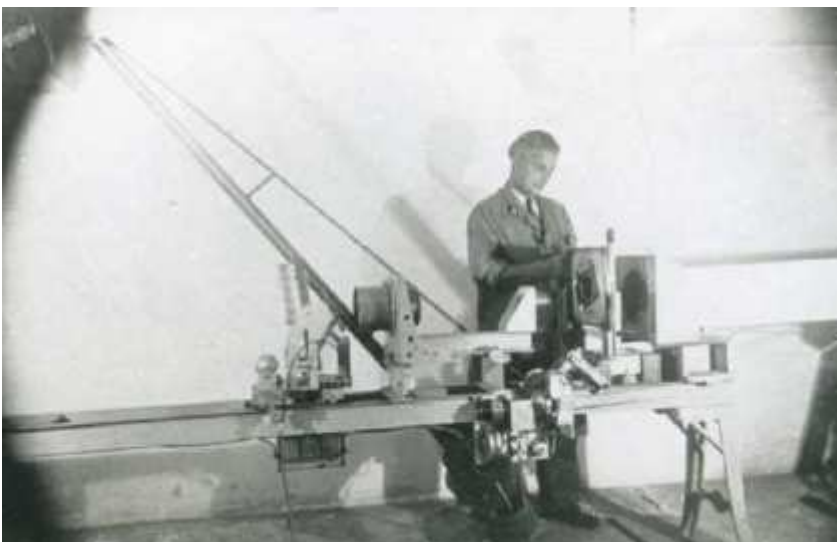
Les premières observations spectro polarimétriques ont été réalisées à Meudon vers 1962 avec la grille de Hale contenant un matériau quart d'onde : les composantes circulaires droite et gauche de l'effet Zeeman sont mises en évidence sur la tache (lignes alternées) ; chaque colonne donne le spectre (raie du fer vers 630 nm) de coupes adjacentes sur le Soleil © Obs Paris



Audoin Dollfus prépare en 1956 une observation ballon de la granulation solaire à 6000 m d'altitude. On voit ici l'ensemble en cours de réglage au Château de Meudon © Obs Paris

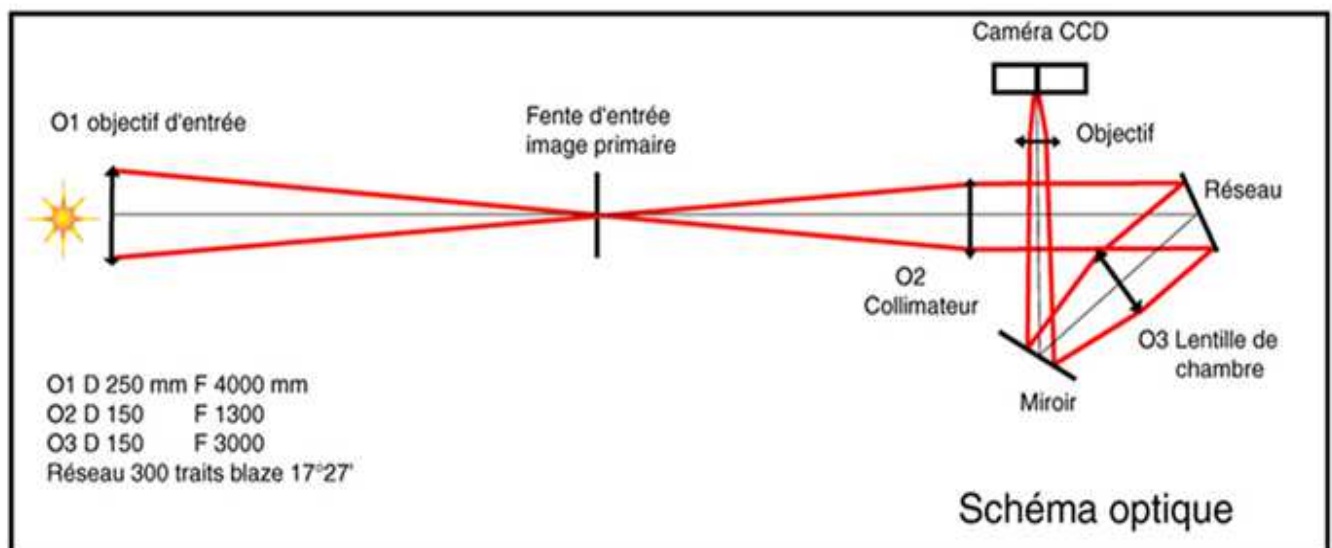


*Bernard Lyot (à gauche) et Lucien d'Azambuja (à droite) à Louksor en 1952
© Obs Paris*



*Marcel Brebion « un des meilleurs ouvriers de France » et l'anamorphoseur de clichés solaires, imaginé par Roger Servajean (1949), qui fut à la base de la réalisation des cartes synoptiques en coordonnées rectangulaires
© Obs Paris*

II - Spectrohéliographe de Meudon



Le spectrohéliographe de Meudon est composé d'une lunette de 0.25 m d'ouverture (objectif O1) alimentée par un coélostat et de $f = 4$ m de focale. L'objectif est **diaphragmé à 0.17 m** en raison de ses défauts. Cette lunette se déplace sur un chariot mobile à vitesse constante, permettant de balayer la surface du soleil (sans bouer le coélostat), et alimente un spectrographe à fente dont le miroir collimateur a une focale f_1 de 1.3 m (O2) ; l'objectif de chambre (O3) a une focale f_2 de 1 m. L'élément dispersif est un réseau de diffraction de 300 traits/mm et d'angle de base 17° . L'angle d'incidence sur le réseau vaut $i = 7^\circ$, et l'angle de diffraction est voisin de 27° .

1 - Dimension de l'image solaire au foyer de la lunette

Le diamètre angulaire du soleil vaut $\alpha = 9.3$ milli radians en moyenne (diamètre solaire divisé par la distance soleil terre), ou 0.53° , ou $32'$, ou $1920''$; le diamètre d de l'image du soleil au foyer est égale à $d = \alpha f$ soit 37.2 mm (en moyenne)

2 - Pouvoir séparateur théorique

Compte tenu du diaphragme de 0.17 m, le pouvoir séparateur théorique vaut:

0.6 arc sec dans le bleu à 393 nm

1.0 arc sec dans le rouge à 656 nm

C'est à dire bien mieux que la qualité d'image à Meudon voisine de 2 arc sec.

La fente du spectrographe de 30 microns sélectionne une tranche de 1.55 arc sec compatible avec le "seeing" courant du site de Meudon. Il n'y a donc pas de limitation par l'objectif.

3 - Hauteur de l'image solaire à la sortie, réduction d'image, taille sur le CCD

Le spectrographe réduit l'image dans le rapport $f_2/f_1 = 0.77$; sa dimension est donc égale à la sortie du spectro à $d = \alpha f f_2/f_1 = 28.6$ mm.

Cette dimension étant plus grande que celle du capteur (26.8 mm), il est procédé à une réduction par un facteur 0.9 de sorte que le soleil mesure 25.7 mm sur le capteur soit 1280 pixels, le capteur faisant 1340 x 100 pixels de 20 microns.

4 - Dispersion, pixel spectral et résolution spectrale

le spectrohéliographe sert à observer la raie H α à 6563 Å et la raie CaI à 3934 Å. Dans quels ordres d'interférence voit on ces raies ?

$\sin i + \sin i' = k \lambda / d$ avec $i = 7^\circ$, $i' = 27^\circ$ et $d = 1/300$ mm donne $k \lambda = 19195$ avec λ mesuré en Å.

Pour l'ordre 3 on trouve $\lambda = 6398$ Å et pour l'ordre 5 on obtient $\lambda = 3839$ Å, ce qui veut dire que les deux raies sont observées aux ordres 3 et 5, mais pour des valeurs de i' voisines de 27° .

La dispersion est donnée par $dx / d\lambda = k f_2 / (d \cos i')$ avec $f_2 = 1$ m

$k = 5$ donne $dx / d\lambda = 0.17$ mm/Å dans le bleu

$k = 3$ donne $dx / d\lambda = 0.10$ mm/Å dans le rouge

La dispersion est réduite de 0.9 par l'objectif devant la caméra et devient:

$k = 5$ donne $dx / d\lambda = 0.15$ mm/Å dans le bleu

$k = 3$ donne $dx / d\lambda = 0.09$ mm/Å dans le rouge

Quelle est la valeur du pixel spectral en Å ?

Comme les pixels de la caméra ont une taille de 20 μ , on a la correspondance suivante :

Pour $k = 5$, 1 pixel = 0.13 Å

Pour $k = 3$, 1 pixel = 0.22 Å

Résolution spectrale $d\lambda = dx \cdot d \cos i / (k f_1)$ avec $f_1 = 1.3$ m avec dx largeur de la fente = 30 microns

Pour $k = 5$, $d\lambda = 0.15$ Å

Pour $k = 3$, $d\lambda = 0.25$ Å

5 - Distance dans le spectre entre les deux raies

Pour $\lambda = 6563$ Å on trouve $i' = 27.96^\circ$ et pour $\lambda = 3934$ Å on a $i' = 27.92^\circ$, soit une différence angulaire $\Delta i'$ de 0.04° correspondant à $6.45 \cdot 10^{-4}$ rd. L'écart des deux raies dans le spectre est égal à $\Delta i' f_2$. Avec $f_2 = 1$ m, on trouve un écart de 0.65 mm dans le spectre (0.58 mm en tenant compte de la réduction 0.9).

6 - Capteur CCD de Princeton Instruments

CCD Array

Princeton Instruments exclusive
back illuminated; MPP only;
VIS/AR + Lumogen coating

Format

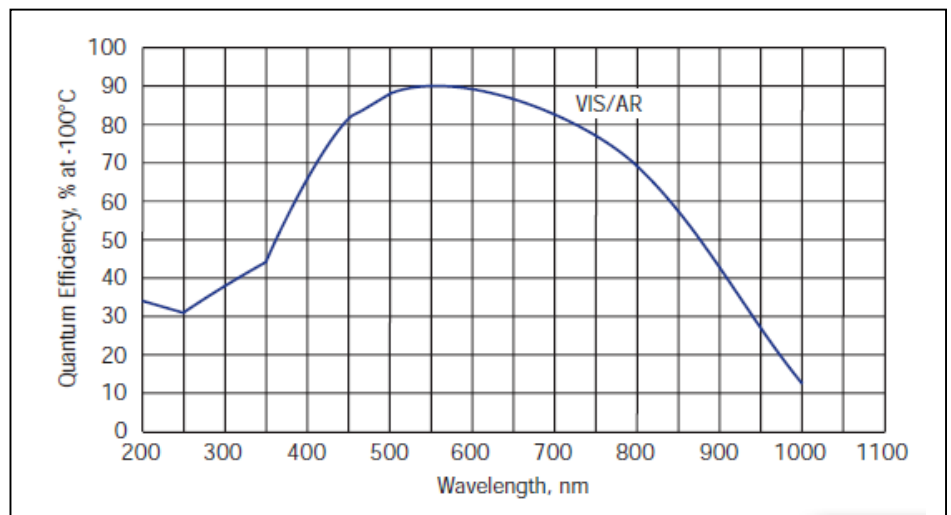
1340 $\times$ 100; 26.8 $\times$ 2.0 mm
overall; 20 $\times$ 20 μ m pixels; shift
register along long axis for parallel
mode spectroscopic detection

Spectrometric Well Capacity

200,000 electrons

Readout Noise

2-4 electrons at 50 kHz;
6-9 electrons at 1 MHz



Dynamic Range 14 ou 16 bits selon vitesse de lecture
Operating Temperature - 40°C ou moins
Scan Rate 50 kHz to 1 MHz (1 MHz utilisé)

Il s'agit d'un capteur de marque Princeton Instruments "Back illuminated" de rendement quantique exceptionnel (60 % dans le bleu, 90 % dans le rouge) de dimension 1340 x 100 x 20 microns.

Le capteur fonctionne artificiellement en transfert de trame grâce à une modification (masque sur la moitié du capteur) réalisée par l'atelier du SERT en 2000.

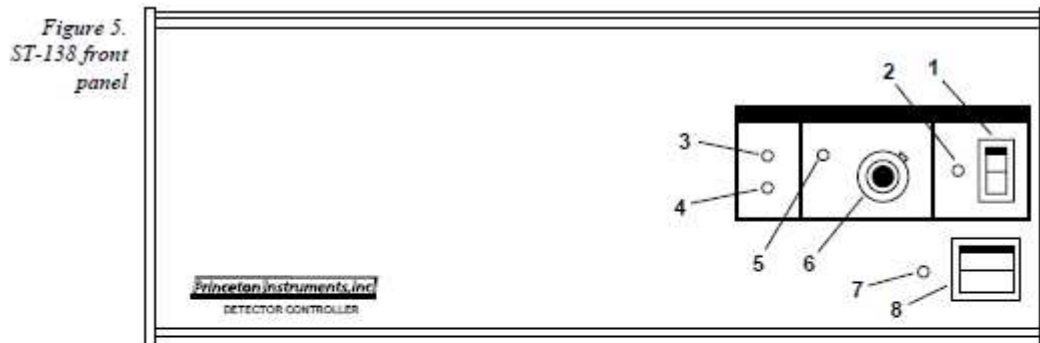
Il fonctionne à la vitesse de 1 MHz donnant une dynamique de $200000 \text{ e} / 12 \text{ e} = 16000$ (14 bits), le bruit de lecture étant de l'ordre de 12 e.

A mi saturation, le rapport S/B est excellent et d'environ $300 = 100000^{1/2}$

Le capteur est refroidi à -40° par un circuit d'eau et deux étages Peltier, rendant le courant d'obscurité stable et faible.

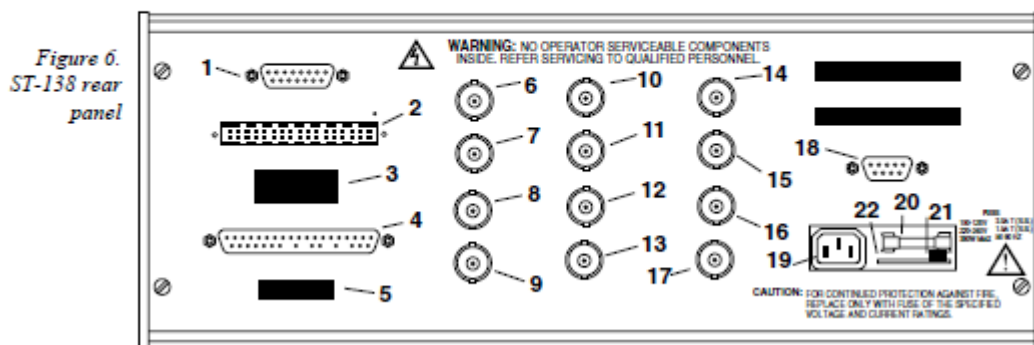
7 - Contrôleur caméra ST138 de Princeton Instruments

Le contrôleur est relié au PC de pilotage par une carte PCI et une liaison série spécifique.



Front panel functions

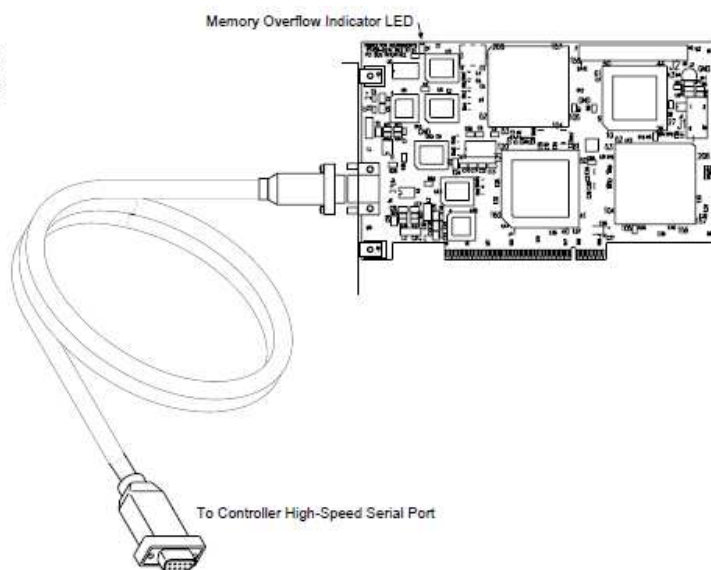
1. Cooler power switch
2. Cooler power indicator (yellow)
3. Cooler status (yellow) indicates that the camera is not yet thermostated
4. Cooler status (green) indicates that the camera is thermostated to within $\pm 0.05^\circ\text{C}$ of the set temperature
5. Warning indicator (red) if temperature is set too low
6. Temperature setting potentiometer, calibrated in minus $^\circ\text{C}$
7. Power on indicator (yellow)
8. Controller power switch



Rear panel functions

	Label	Function
1.	J6	Digital sync for frame grabber board
2.	J5	Auxiliary port (34-pin), 8-bit software programmable digital I/O port, see Appendix B
3.	IEEE-488	Not used with the ST-138.
4.	DETECTOR	Detector head cable connector: DB-37-M
5.	RS-232	Serial port for communicating via RS232C
6.	CRT X	X-ramp signal for multisync monitor
7.	TRIGGER OUT	TTL low (negative edge) during data acquisition
8.	NORMALIZE 1	Not Used
9.	NORMALIZE 2	Shutter monitor (optional)
10.	CRT Y	Video out monitor: 0-10 V
11.	TRIGGER IN	External trigger input: TTL low level activated
12.	NOTSCAN	TTL low when sensor is being read; TTL high indicates sensor currently being exposed
13.	NORMALIZE 3	Kinetics Timing (<i>see page 49</i>)
14.	CRT Z	Negative blanking signals for XYZ monitor
15.	EXT SYNC	External sync input: TTL low level activated
16.	SHUTTER	External shutter control; TTL level; TTL low forces shutter open. In certain timing modes, complete control of shutter is possible.
17.	NORM 4/VIDEO	0-1.3 V normalized video out for frame grabber board
18.	J7	Connector for communicating with Serial Buffer Board inside computer
19.		AC power cord slot
20.		Fuse
21.		Fuse release lever
22.		Voltage selector card

Figure 7.
PCI serial
board



8 - Chariot porte-objectif, coulisse porte caméra et positionneur à filtres sélectionneurs d'ordre

Le chariot mobile assure la translation de l'objectif d'entrée sans avoir à bouger le coélostat. Les filtres sélectionneurs d'ordre (3, 5) sont des filtres colorés larges de 100 nm de bande passante montés dans une coulisse motorisée. La caméra CCD est positionnée également sur une coulisse permettant d'observer soit la raie H α , soit la raie CaII K en se translatant dans le spectre. L'électronique a été réalisée par Denis Ziegler et François Colson, plusieurs vitesses de translation continue sont possibles pour le chariot, liaison RS232 utilisée pour tous les dispositifs.

9 - Programme d'acquisition des données

A été réalisé par Denis Ziegler en Visual Basic V5 sous XP.

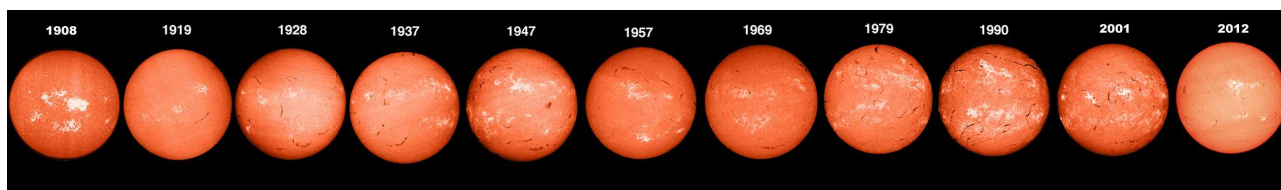
Il pilote le chariot porte objectif, le positionneur à filtres, la coulisse porte caméra et la caméra CCD. Le programme exécute WINVIEW, le logiciel de Princeton Instruments, en tâche de fond. Les images sont écrites en format TIF 16 bits.

10 - Programme de traitement et de mise en forme des données

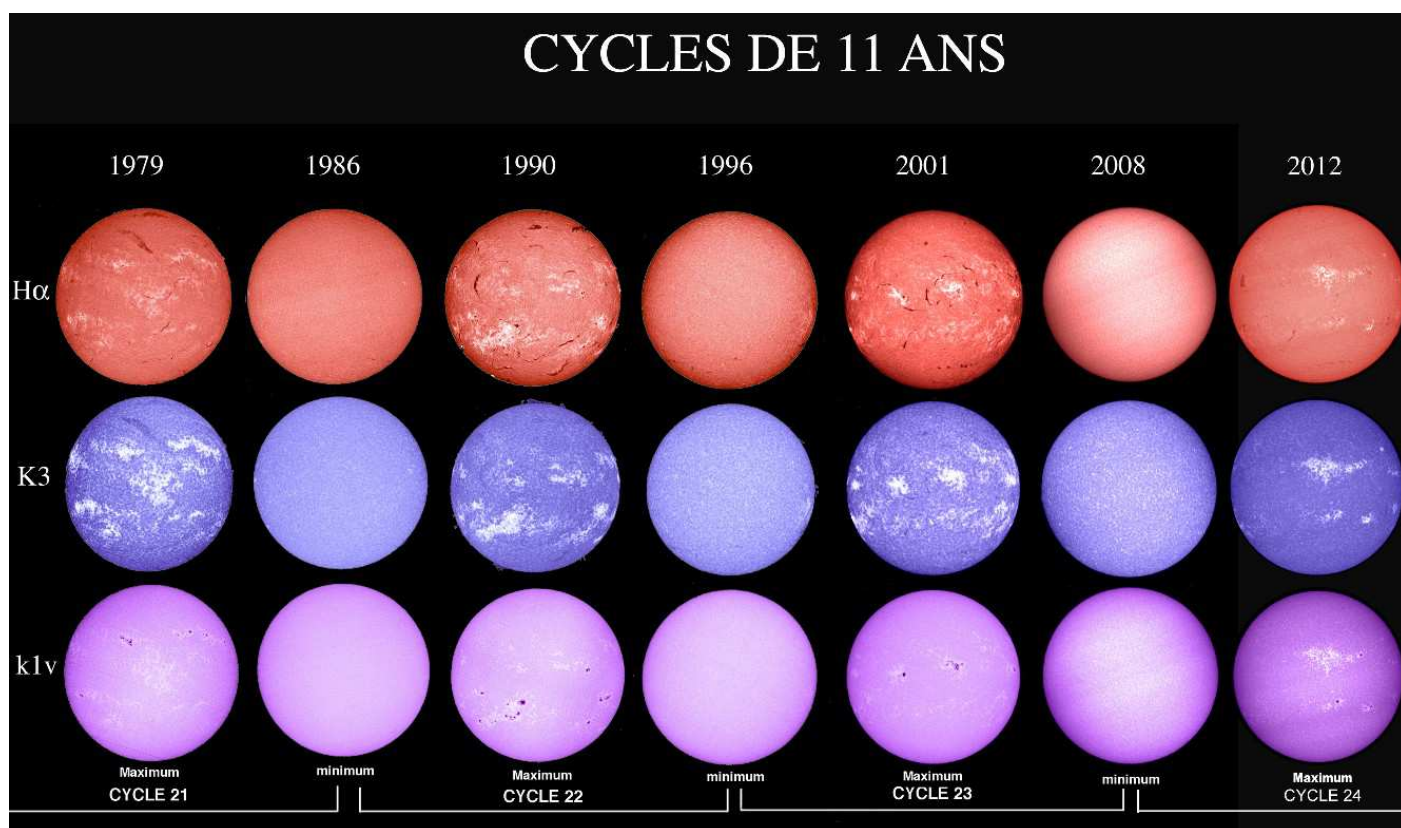
Ecrit en langage IDL par Jean Bonmartin et Jean-Marie Malherbe, le logiciel sort des fichiers FITS 3D comportant 5 longueurs d'onde à cheval sur le coeur des raies: 2 points dans l'aile rouge, 1 point au coeur de la raie, 2 points dans l'aile bleue. Le programme IDL corrige l'orientation des images, génère des images "quick look" type GIF, JPEG, etc... et procède à l'insertion dans la base de données solaires BASS2000; le réseau mondial H α (USA, Big Bear) vient y puiser les images automatiquement via FTP.



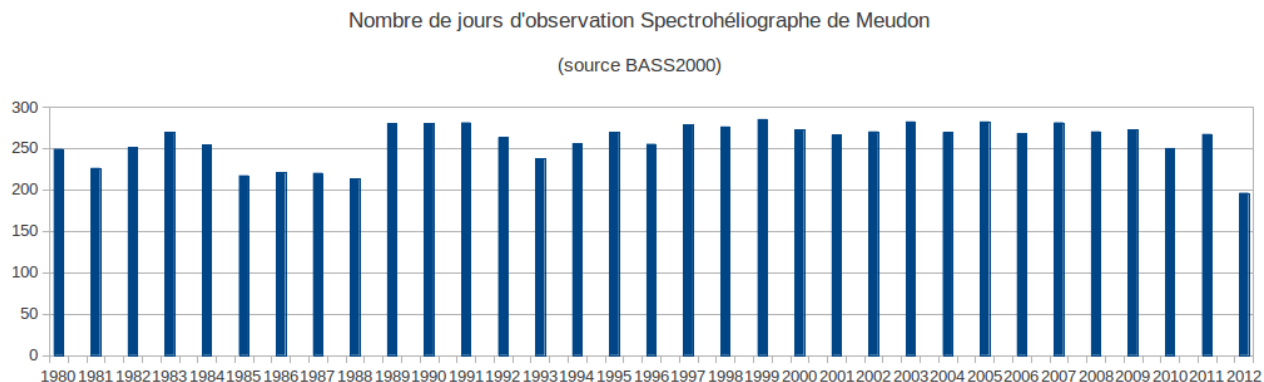
Fente du spectrographe (à gauche) et miroirs du coélostat (à droite)



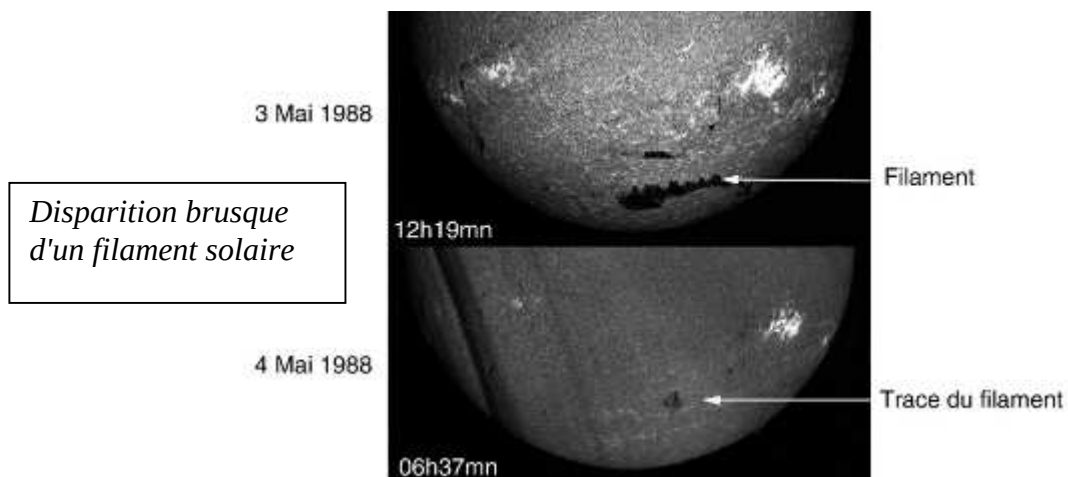
Cycles solaires en H α au spectrohéliographe



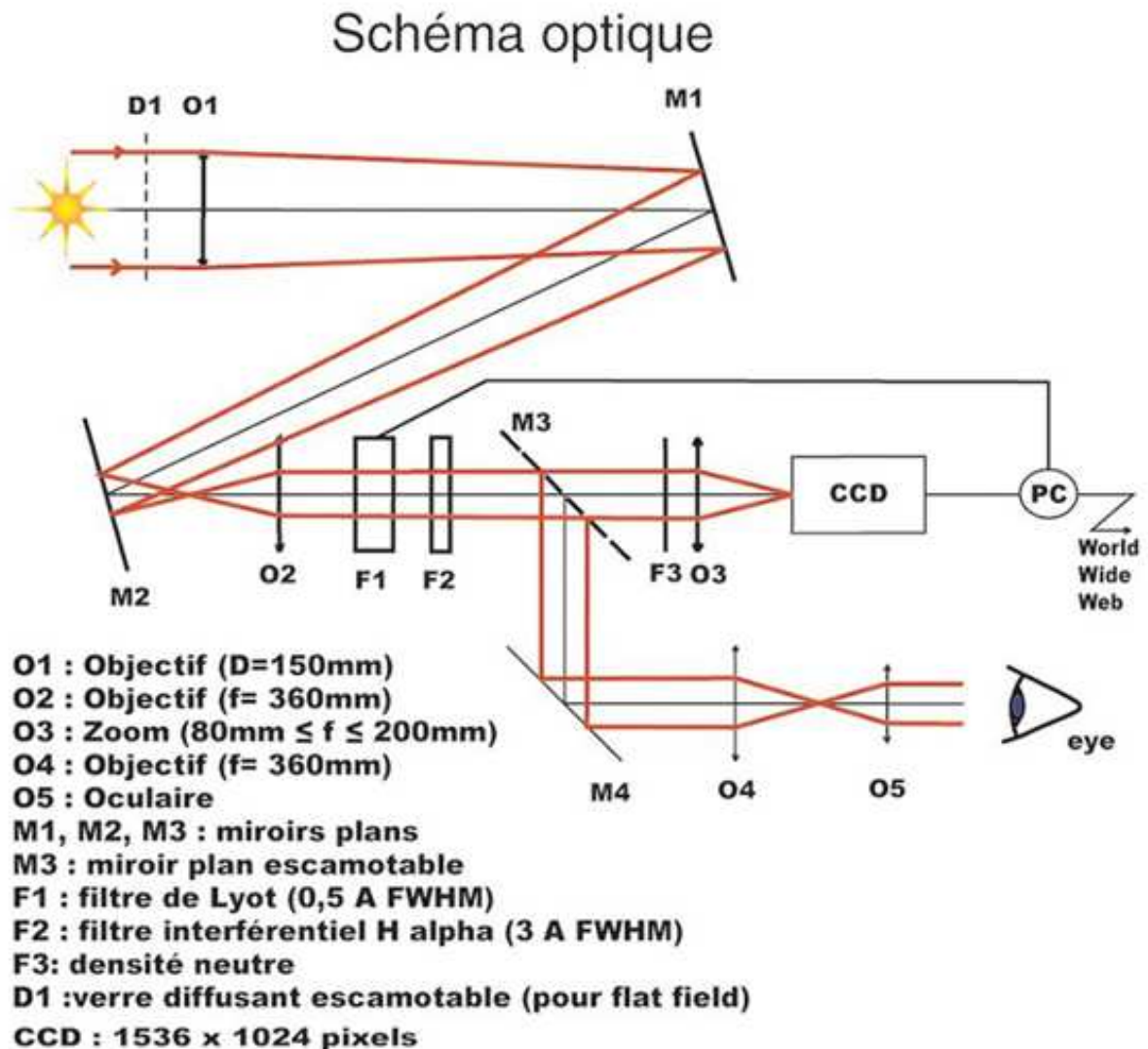
10 cycles solaires ont été observés à Meudon avec le spectrohéliographe



Nombre de jours d'observation avec le spectrohéliographe, en moyenne 260 jours par an



III - Héliographe Halpha de Meudon dit "lambda variable" ayant fonctionné jusqu'en 2004 (ayant produit de nombreuses données enregistrées)



L'ancien héliographe Ha de Meudon est composé d'une lunette de 0.15 m d'ouverture (objectif O1) et de $f_1 = 2.250$ m de focale. Cette lunette alimente un système afocal (O2,O3) dans lequel on place le filtre thermostaté; l'objectif de sortie O3 possède une focale variable (zoom Nikon 80-200 mm ouvert à 2.8) de sorte que le grandissement du système afocal est $f_3/f_2 < 1$. On choisit $f_3=140$ mm.

1 - Dimension de l'image solaire au foyer de la lunette

Le diamètre angulaire du soleil vaut $\alpha = 9.3$ milli radians en moyenne (diamètre solaire divisé par la distance soleil terre), ou 0.53° , ou $32'$, ou $1920''$; le diamètre d de l'image du soleil au foyer est égale en sortie à $d = \alpha f_1 (f_3/f_2)$ = soit 8.1 mm (en moyenne), et 21 mm au foyer primaire.

2 - Pouvoir séparateur théorique

le pouvoir séparateur théorique vaut:
 1.1 arc sec dans le rouge à 656 nm

C'est à dire bien mieux que la qualité d'image à Meudon voisine de 2 arc sec.
 Les pixels étant de 9 microns, on a 1 pixel = 2.1 arc sec (sous échantillonnage d'un facteur 2)

3 - Filtre biréfringent de LYOT à 2 filtres entrelacés (3 + 2 étages)

La pièce maîtresse est un filtre de LYOT accordable en bande passante permettant d'explorer le profil de la raie H α par pas de 0.1 Å.

Caractéristiques principales :

filtre primaire à 3 étages (cristaux d'épaisseur e , $2e$, $4e$) avec $e = 4$ mm

filtre secondaire à 2 étages (cristaux d'épaisseur $1.5e$ et $3e$) avec $e = 4$ mm

Les maxima des deux filtres sont en coïncidence sur le coeur de la raie H α

Les minima secondaires du filtre secondaire sont calés sur les maxima secondaires du filtre primaire

Légende de la figure de la bande passante :

Abscisse = longueur d'onde

Trait continu = filtre primaire à 3 étages _____

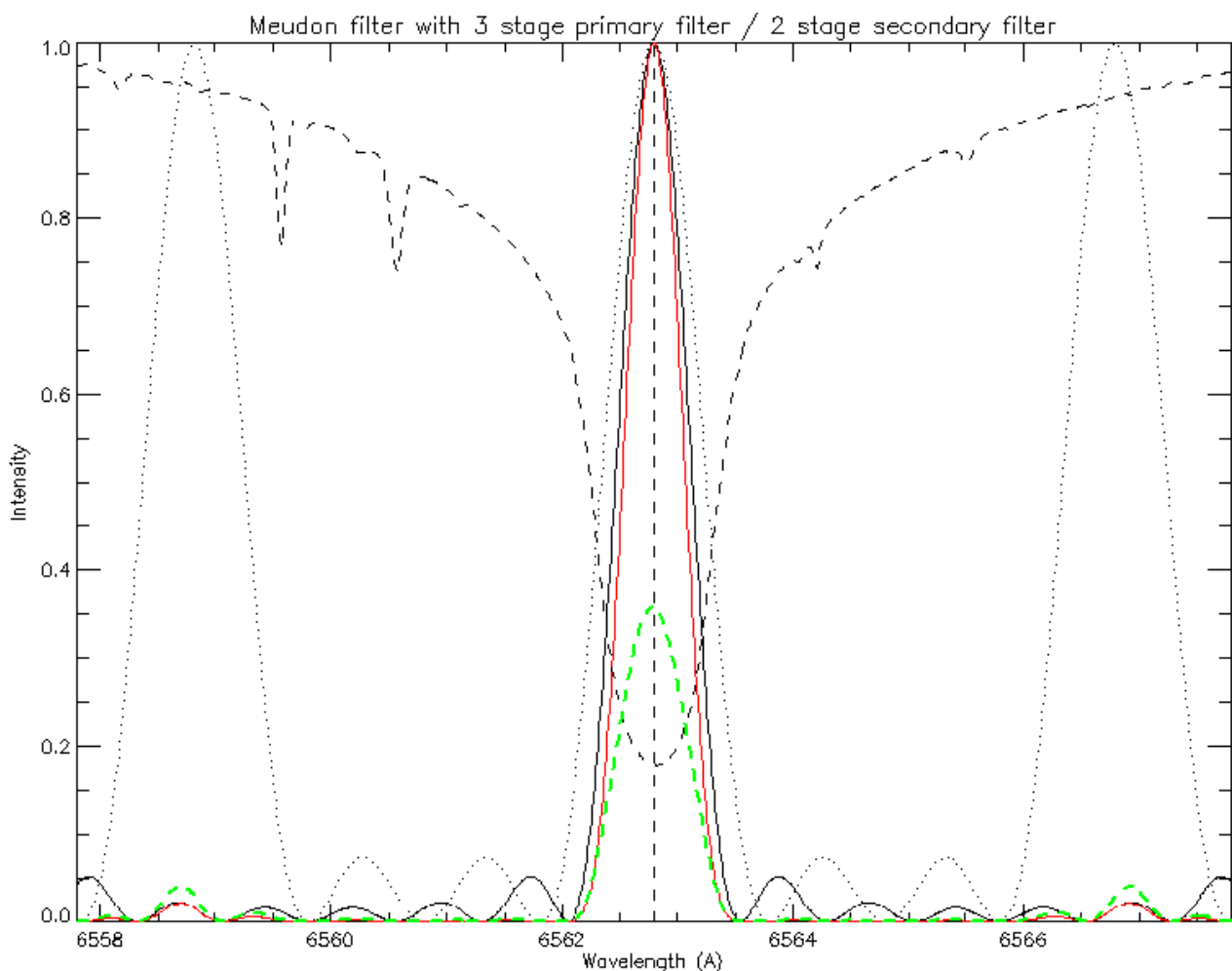
Trait pointillé = filtre secondaire à 2 étages

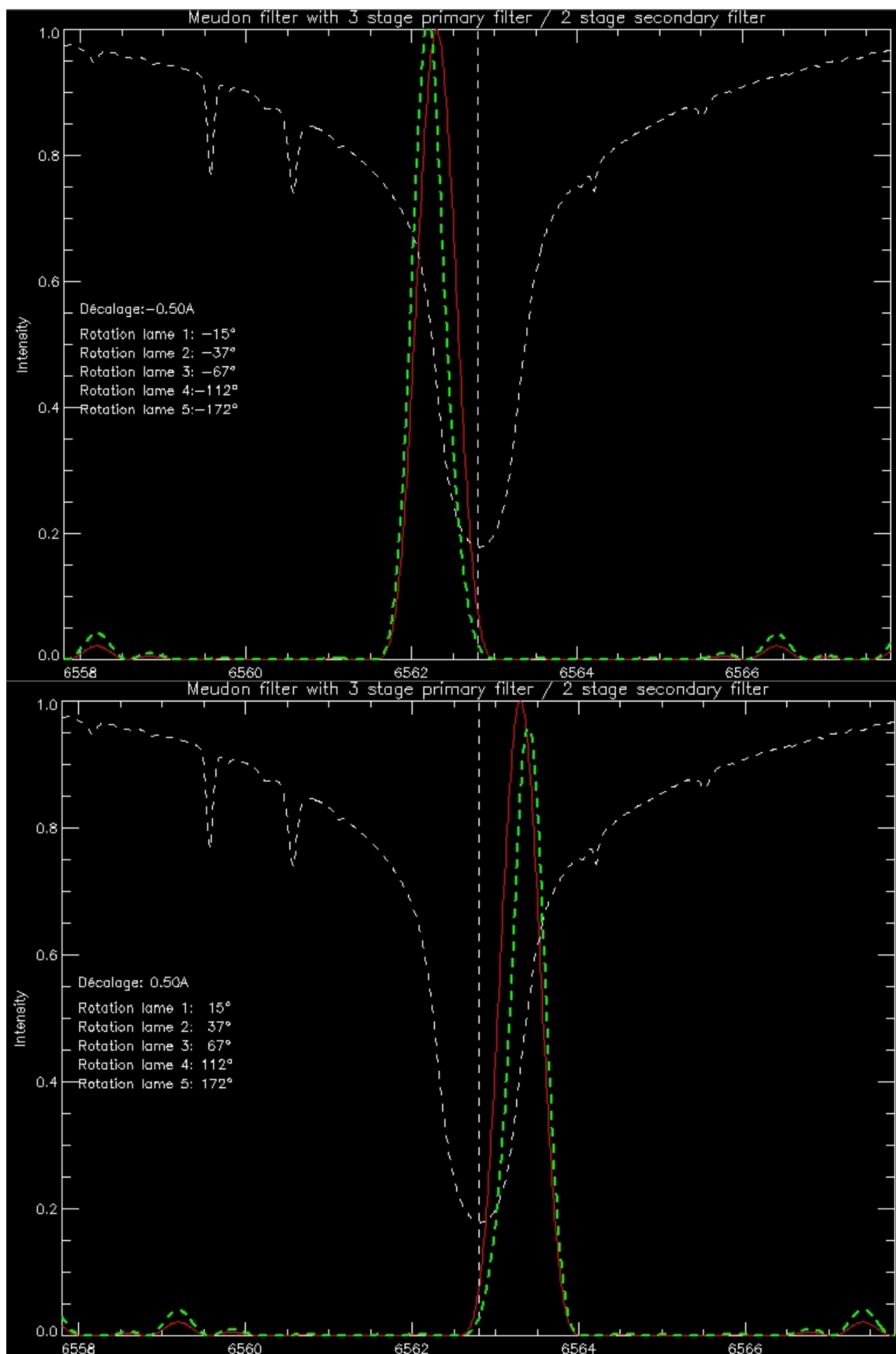
Trait continu rouge = filtre produit résultant de la combinaison primaire/secondaire _____

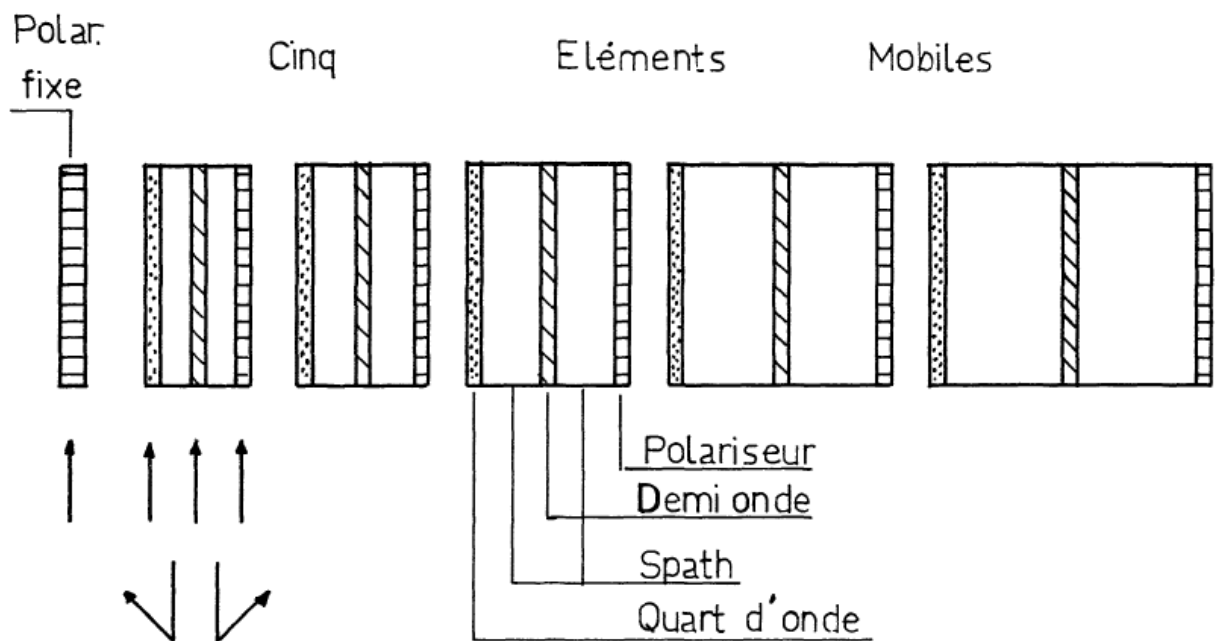
Tirets noirs = raie H α - - - - -

Tirets verts = raie H α vue au travers du filtre - - - - -

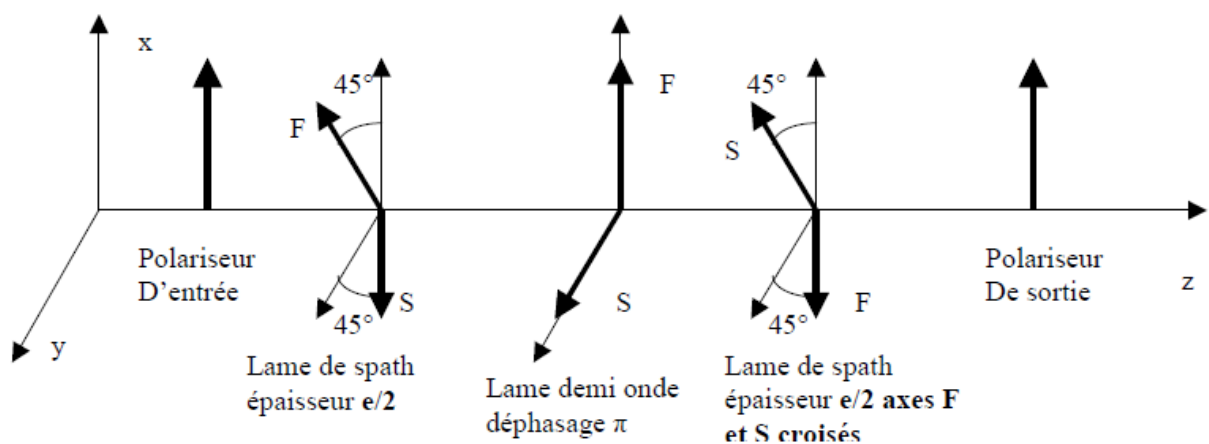
Les cannelures parasites les plus proches sont à 4 Angströms, ce qui implique une pré-filtration par un interférentiel étroit de quelques Angströms de largeur.



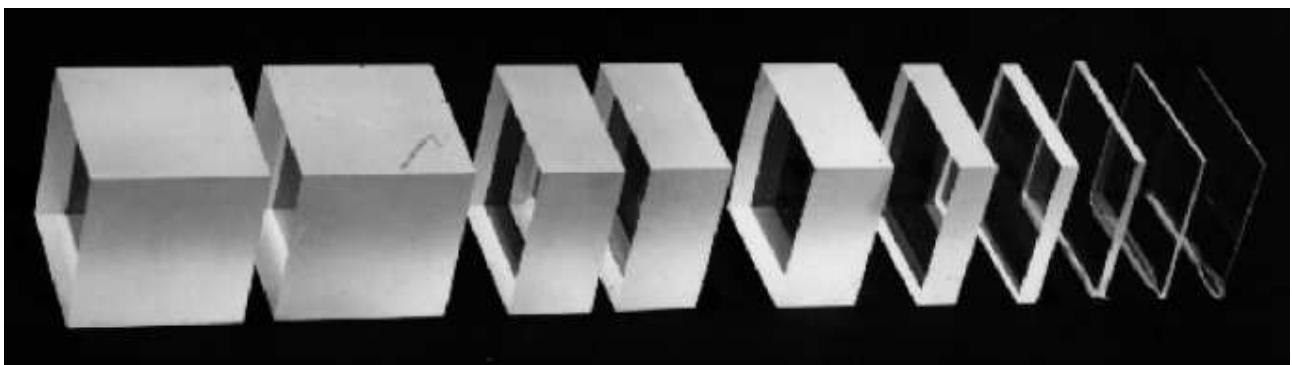




L'étage de LYOT à **grand champ** est basé sur l'utilisation de deux lames de spath de même épaisseur $e/2$, mais dont les axes optiques sont croisés, c'est à dire orthogonaux. L'astuce est la suivante : quand un rayon attaque la première lame sous azimuth nul, il est de $\pi/2$ pour la seconde lame, et vice versa. Pour que les retards des deux lames **s'ajoutent**, on incorpore une lame demi onde entre les deux blocs de spath (sans cette lame demi onde, les retards se retranchent).

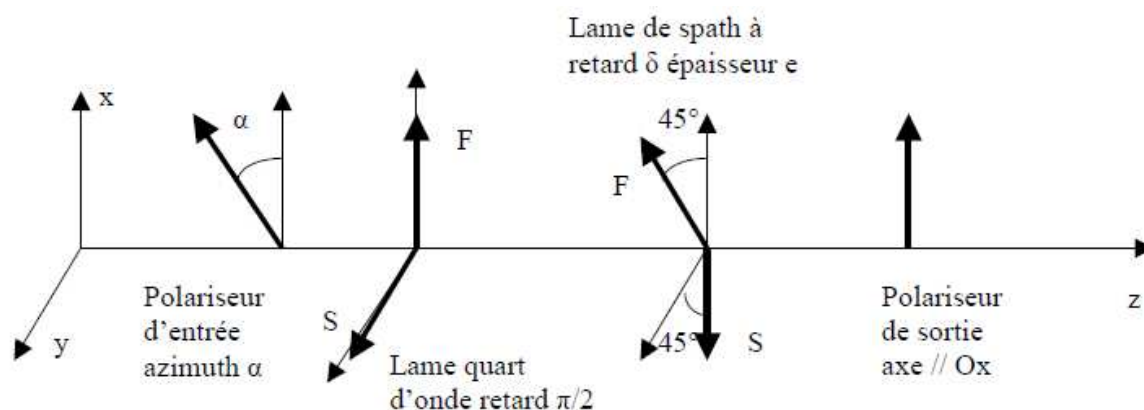
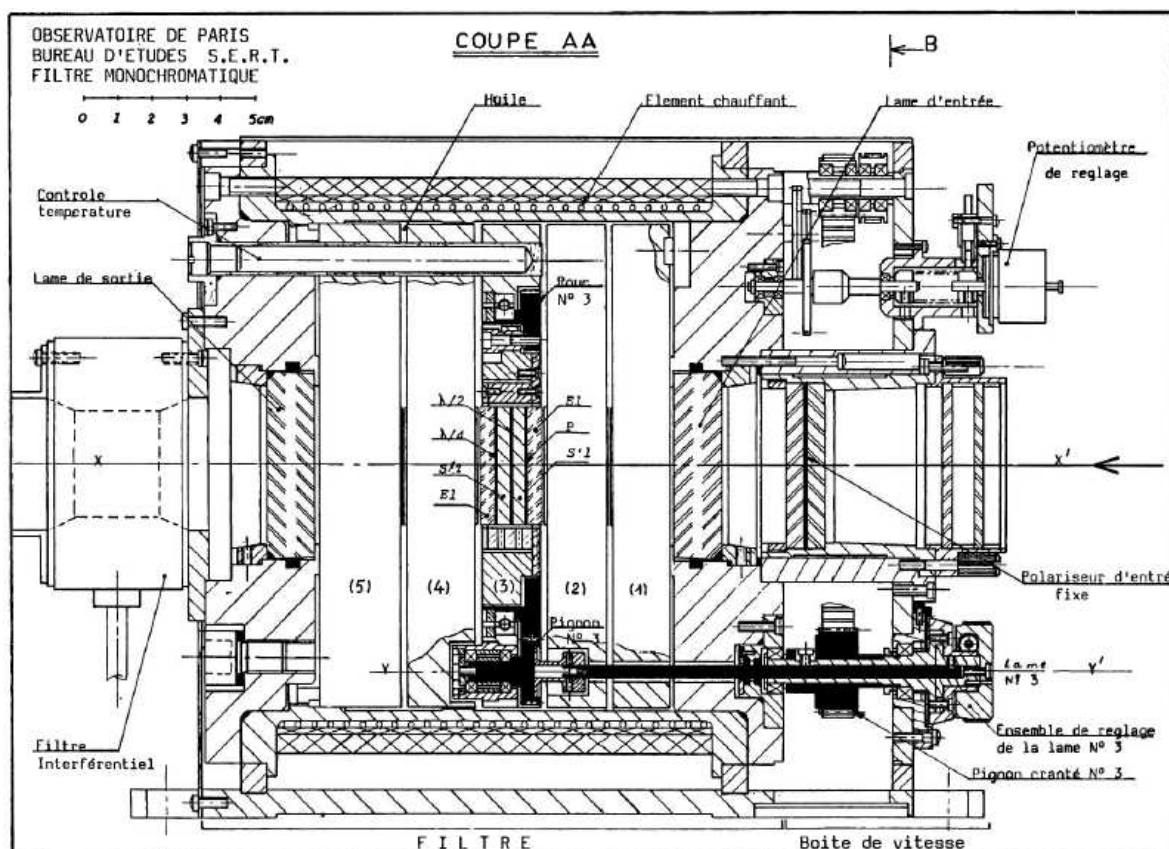


Principe de l'étage de LYOT à grand champ



Etages de LYOT à grand champ

Épaisseur des lames	Rapports		Rotations
4191,3	1		1°
6287,0	1,5		1 + 1,5
8382,7	2	1,333	2,5 + 2 ou 2,5 + (1,5 × 1,333)
12574,0	3	1,5	4,5 + 3 ou 4,5 + (2 × 1,5)
16765,3	4	1,333	7,5 + 4 ou 7,5 + (3 × 1,333)



Etage de LYOT accordable par lame quart d'onde

La lame quart d'onde a pour effet de transformer la polarisation linéaire issue du polariseur en polarisation elliptique (circulaire si $\alpha = 45^\circ$).

On montre aisément que l'intensité émergente I est liée à l'intensité incidente I_0 par la relation :

$$I = I_0 \cos^2(\delta/2 - \alpha) \text{ où } \delta = (2\pi/\lambda) \Delta n e, \Delta n = n_o - n_e$$

On constate donc que l'on a introduit un déphasage α par rapport à la formule de l'étage de LYOT classique $I = I_0 \cos^2(\delta/2)$. On obtient encore un spectre cannelé, et il sera aisé de déplacer les cannelures en faisant varier l'angle α . D'un étage de LYOT au suivant, α sera proportionnel à l'épaisseur de l'étage, c'est à dire en puissance de 2, comme le retard δ .

D'un point de vue pratique, le polariseur d'entrée est fixe et c'est l'ensemble de l'étage de LYOT constitué **d'une lame quart d'onde, d'une lame de spath à grand champ, et du polariseur de sortie** que l'on va mettre en rotation d'angle α à l'aide d'une mécanique motorisée.

Considérons un filtre à **n étages d'épaisseur e, 2e, 4e...** et un filtre à **m étages d'épaisseur d, 2d, 4d...** L'intensité transmise est donnée par :

$$I = I_0 \left[\frac{\sin(2^n(\delta/2 - \alpha))}{2^n \sin(\delta/2 - \alpha)} \right]^2 \left[\frac{\sin(2^m(\gamma/2 - \beta))}{2^m \sin(\gamma/2 - \beta)} \right]^2$$

où $\delta = (2\pi/\lambda) \Delta n e$ et $\gamma = (2\pi/\lambda) \Delta n d$

On choisit d et β de telle sorte que $d = k e$ et $\beta = k \alpha$ où k est un nombre réel tel que $d / e = \beta / \alpha$.

4 - Capteur CCD

Il s'agit d'un capteur de marque KODAK KAF1600 "Front illuminated" de dimension 1536 x 1024 x 9 microns intégré dans une caméra Princeton Instruments pilotée par un contrôleur ST133, relié à un PC sous XP par une interface série PCI spécifique.

Spectrometric Well Capacity

85,000 electrons

Readout Noise

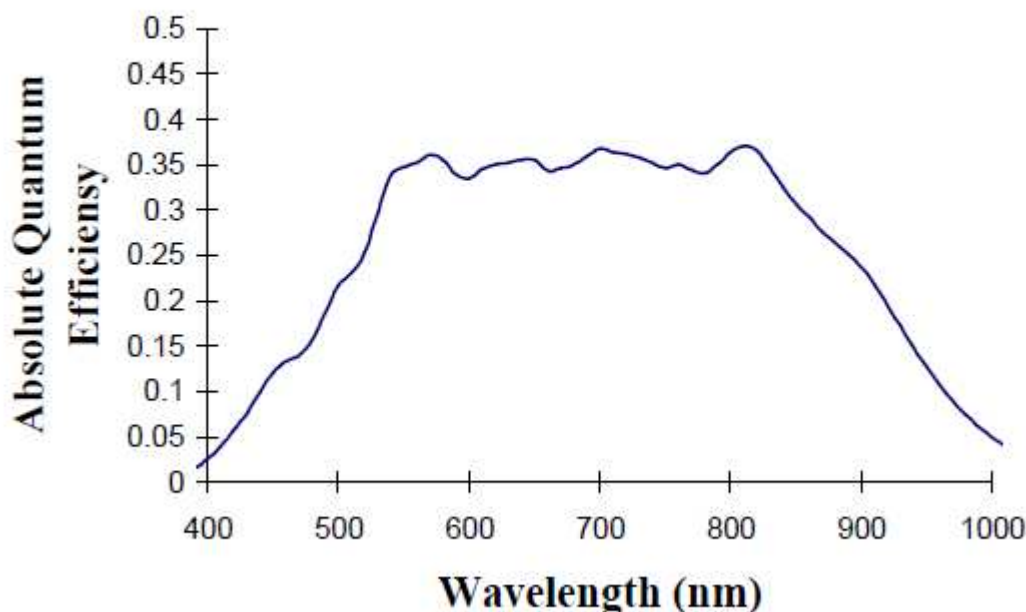
20 electrons at 1 MHz

Dynamic Range 12 bits (4096 niveaux)

Operating Temperature -20°C

Scan Rate 1 MHz

KAF-1600 Spectral Response



La caméra fonctionne à la vitesse de 1 MHz donnant une dynamique de $85000 \text{ e} / 20 \text{ e} = 4000$ (12 bits), le bruit de lecture étant de l'ordre de 20 e.

A mi saturation, le rapport S/B est bon et d'environ $200 = 40000^{1/2}$

Le capteur est refroidi à -20° par un circuit d'eau et deux étages Peltier, rendant le courant d'obscurité stable et faible.

5 - Contrôleur ST133 de Princeton Instruments

Le contrôleur est relié au PC par une carte PCI et une liaison série spécifique.

6 - Electronique de commande du filtre de LYOT et thermostat

Electronique de commande TTL réalisée par François Colson.

Thermostat réalisé par François Colson et Alain Docclo (2 identiques), température de 46°

7 - Programmes d'acquisition et de traitement

A été réalisé par Jean-Marie Malherbe en Visual Basic V5 sous XP.

Il pilotait la commande du filtre et la caméra CCD. Le programme exécute WINVIEW, le logiciel de Princeton Instruments, en tâche de fond. Les images sont écrites en format FITS 12 bits.

Le traitement des données, avec film MPEG et courbe de lumière, ont été réalisés par Jean-Marie Malherbe en langage IDL.



Héliographe Ha au centre

IV - Héliographe de Meudon, lunette Calcium CaII H

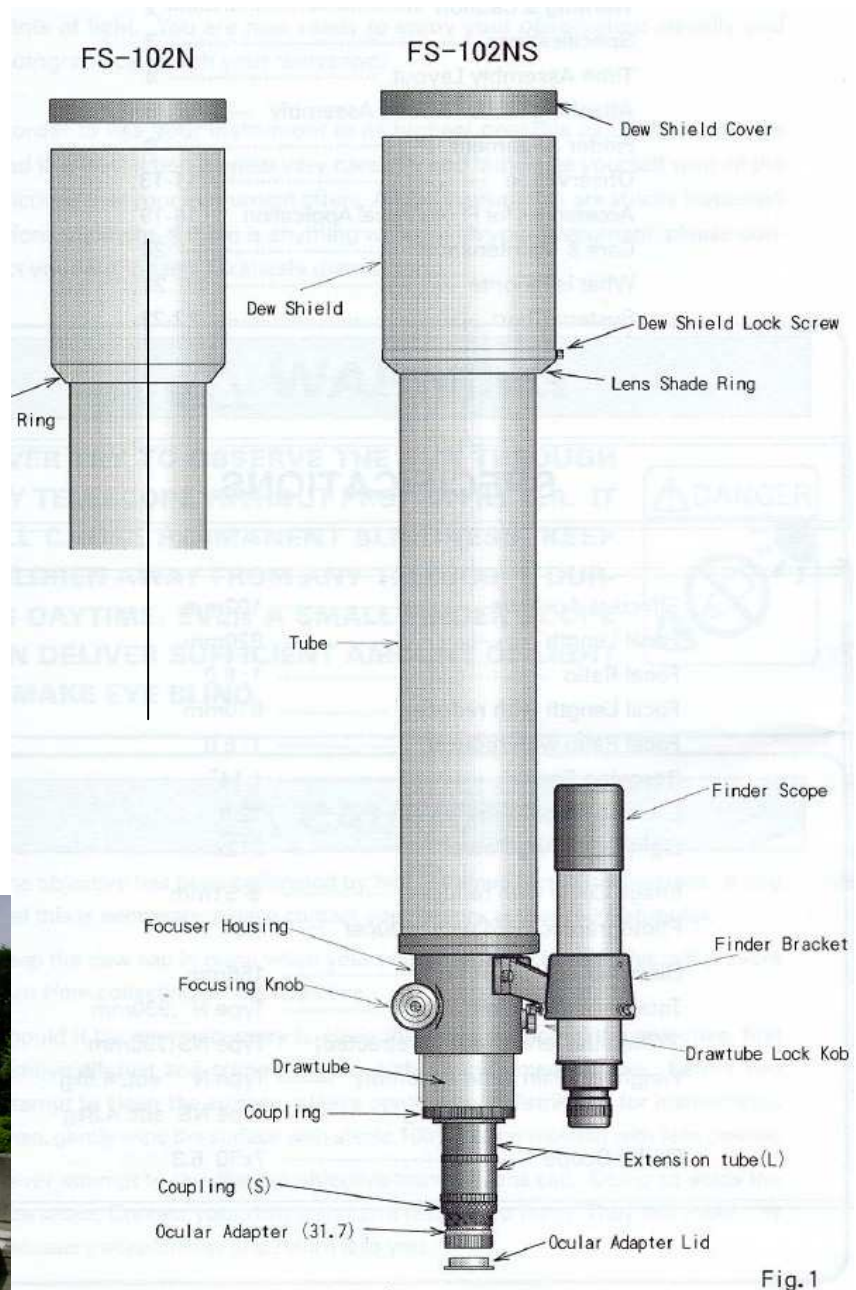


Fig.1

Cet instrument sert à surveiller l'activité solaire au niveau chromosphérique dans la raie H du Calcium à 396.8 nm (intégration sur le profil au voisinage du coeur de raie).

1 - Instrument

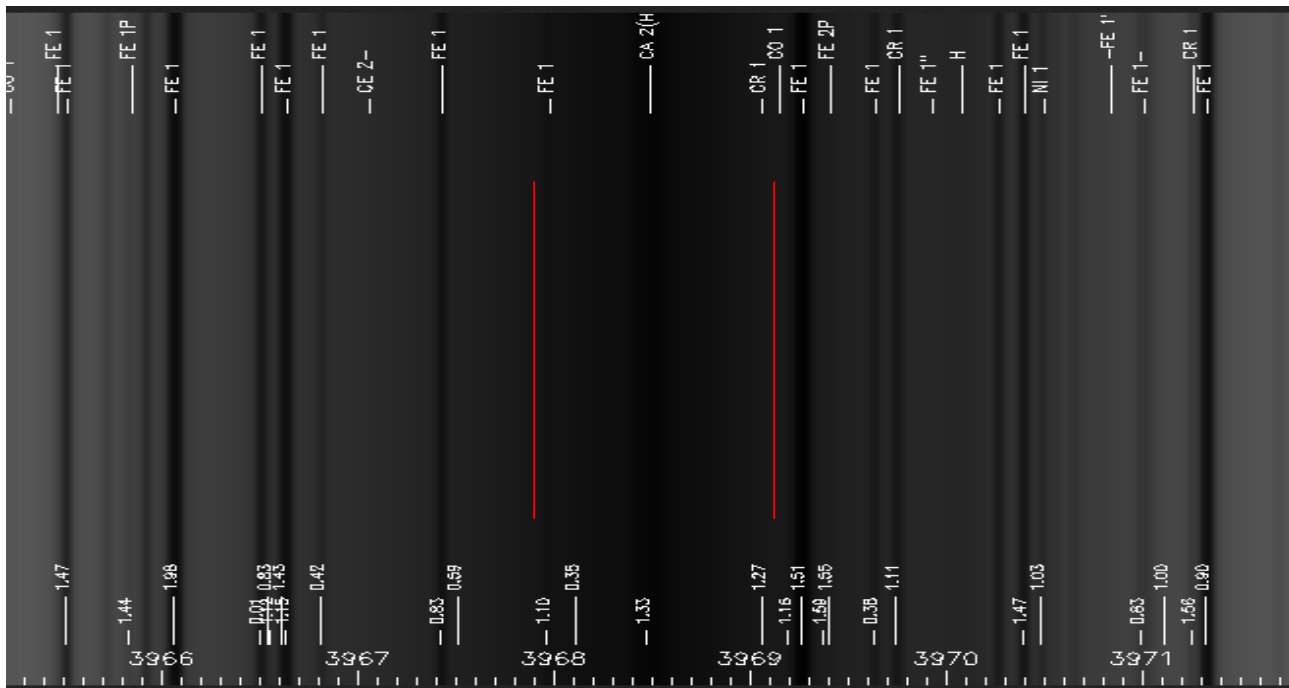
Lunette fluorite à deux verres (doublet apochromatique) de marque Takahashi, modèle FS102N, D = 102 mm, F = 820 mm.

Un filtre anti calorique KG3 d'un diamètre de 70 mm est placé devant l'objectif en pleine ouverture et définit la pupille d'entrée de la lunette. La lunette travaille donc en réalité à F/11.7 (demi angle du cône de lumière = 2.5°).

Au foyer, le faisceau traverse un second filtre KG3 de 25 mm de diamètre placé devant un filtre Barr Associates centré sur la raie CaII H avec une bande passante de 1.2 Å à mi-hauteur. Ce filtre fait 25 mm de diamètre. Il est centré correctement pour la température de 23°C sur 396.85 nm en

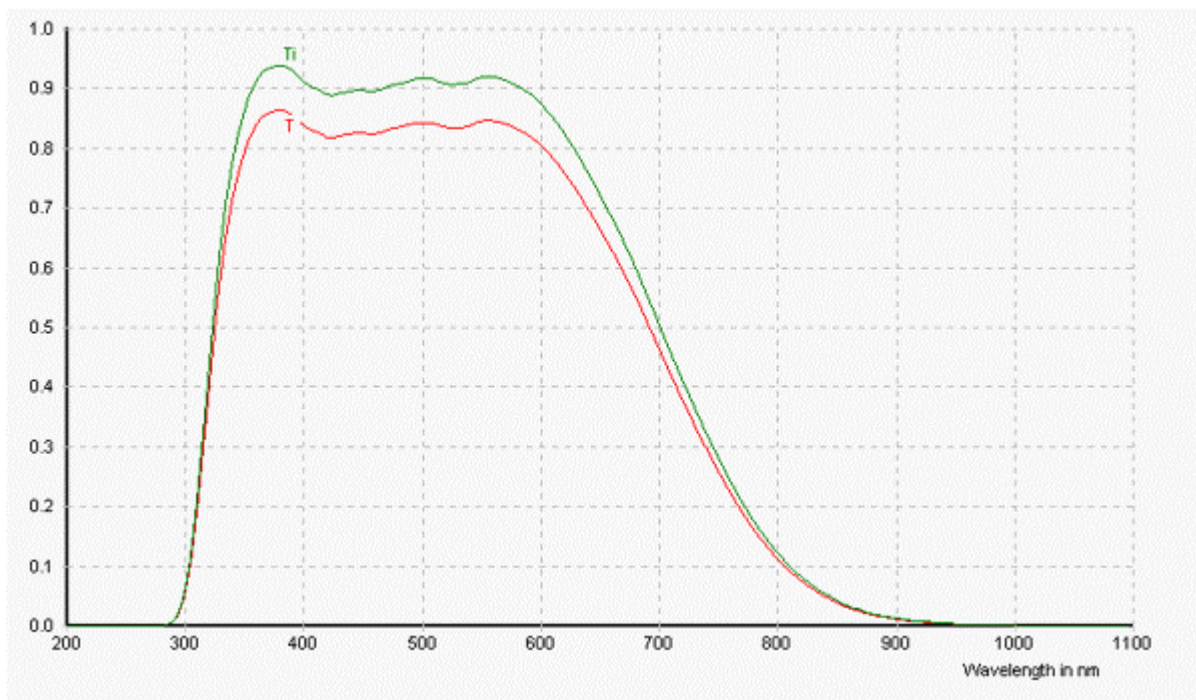
faisceau collimaté (396.80 pour un cône de demi angle 2.5°). Le constructeur donne une dérive très faible de 0.02 Å par °C de la bande passante.

La lunette est fixée sur la monture équatoriale de l'héliographe à l'aide de colliers. Un moteur de mise au point avec raquette a été installé.



Raie CaII H, les bornes de la largeur d'intégration à mi hauteur par le filtre sont indiquées

2 - Courbe de transmission du filtre anti-calorique KG3



Le filtre coupe l'IR à partir de 800 nm (transmission < 10 %)

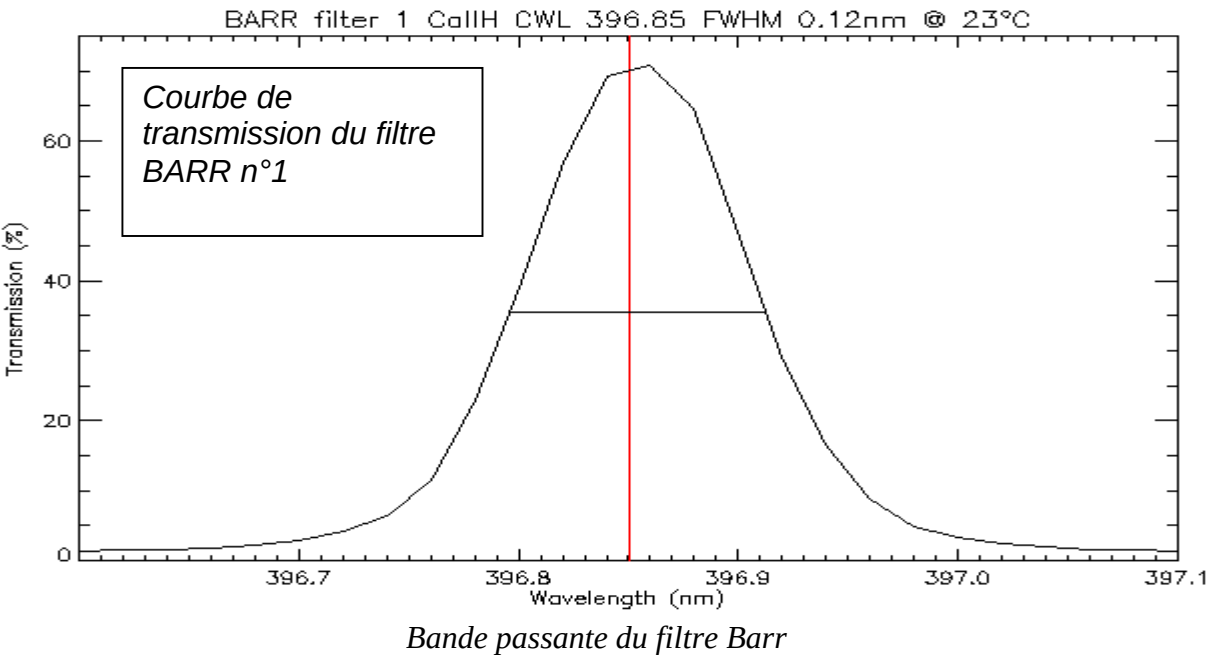
3 - Courbe de transmission du filtre Barr

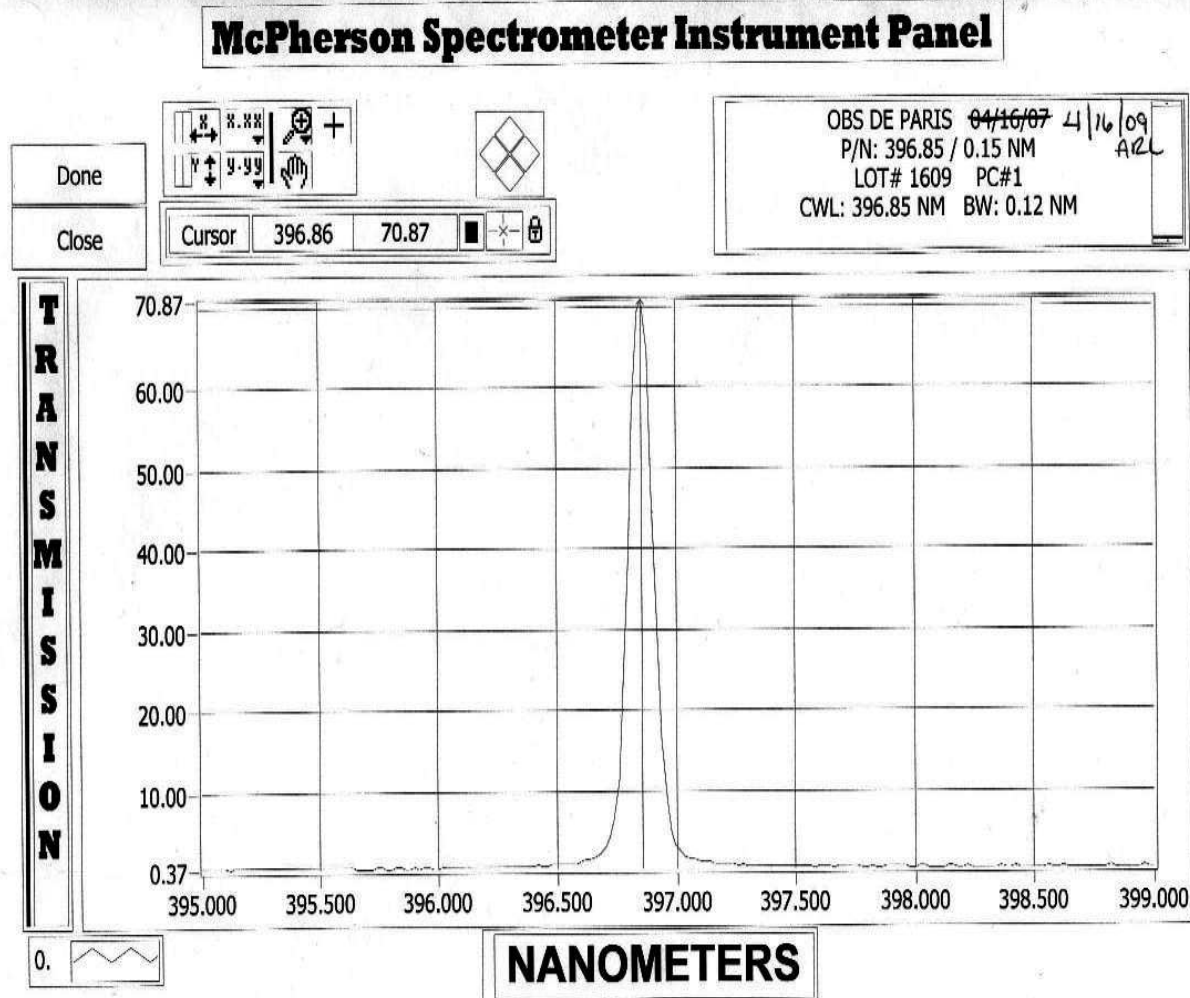
Le filtre possède un pic de transmission de 70 %. Valeurs et courbe ci dessous.

2 filtres ont été commandés. Le filtre 1 est monté sur la lunette.

Observatoire de Paris (PO#: L 25031/CI, Barr#: 53718)
P/N: 396.85/0.15nm
Lot#: 1609

Piece #	1	2	Blocking 200-1200nm	
CWL_col (nm)	396.85	396.85		
CWL_2.5° (nm)	396.80	396.80		
FHWM (nm)	0.12	0.12		
Peak %T	70.9	53.4		
Wavelength (nm)	%T		Wavelength (nm)	OD
396.68	2.15	1.96		
396.70	2.92	2.59		
396.72	4.11	3.72		
396.74	6.41	6.24		
396.76	11.51	10.87		
396.78	22.84	21.44		
396.80	39.15	34.61		
396.82	56.94	46.21		
396.84	69.29	53.38		
396.86	70.87	53.19		
396.88	64.55	47.32		
396.90	47.04	32.75		
396.92	29.01	20.06		
396.94	16.45	11.73		
396.96	8.79	6.49		
396.98	4.78	3.85		
397.00	3.36	2.63		
397.02	2.49	2.01		





Bande passante du filtre Barr

4 - Résolution spatiale

La résolution théorique est de 1.4 secondes d'arc pour une lunette diaphragmée par le filtre anticalorique à 70 mm.

5 - Echantillonnage

Le soleil mesure en théorie et en moyenne 7.62 mm au foyer, soit 2179 pixels de 3.5 microns. En Janvier 2012 (le soleil a un diamètre apparent plus grand en hiver) le calcul théorique donne 7.75 mm soit 2216 pixels. La mesure à partir des observations donne 2226 pixels (très bonne concordance), soit **0.87** seconde/pixel en hiver. On travaille donc avec un très léger sous échantillonnage (0.70 arc sec serait idéal), lorsque la qualité d'image est limitée par la résolution de la lunette (probablement bien peu fréquent).

6 - Données relatives au capteur et caméra

Capteur CMOS IBIS 6600 de CYPRESS

Puits de potentiel maximum = 21500 e⁻

A mi saturation, on a 10000 e⁻ par pixel environ

Bruit de lecture 24 e⁻, bruit de photons à mi saturation voisin de 100 e⁻

Bruit global = $(24^2 + 100^2)^{1/2} = 103$ e⁻ à mi saturation

Rapport signal/bruit voisin de 100 à mi saturation soit 1% de bruit dans le signal
Dynamique $21500/24 = 900$ (10 bits = 1024 niveaux)
Conversion A/D: 21 e⁻ par ADU
Temps de pose voisin de quelques dizaines de ms (dark très faible)
Caméra CMOS de marque Pixelink, modèle PL-B781F

General Specifications

Parameter	Specification	Remarks
Pixel Architecture	3T-Pixel	
Pixel Size	3.5 μm x 3.5 μm	The resolution and pixel size results in a 7.74 mm x 10.51 mm optical active area.
Resolution	2210 x 3002	
Pixel Rate	40 MHz	Using a 40 MHz system clock and 1 or 2 parallel outputs
Shutter Type	Electronic Rolling Shutter	
Full Frame Rate	5 frames/second	Increases with ROI read out and/or subsampling

Electro Optical Specifications

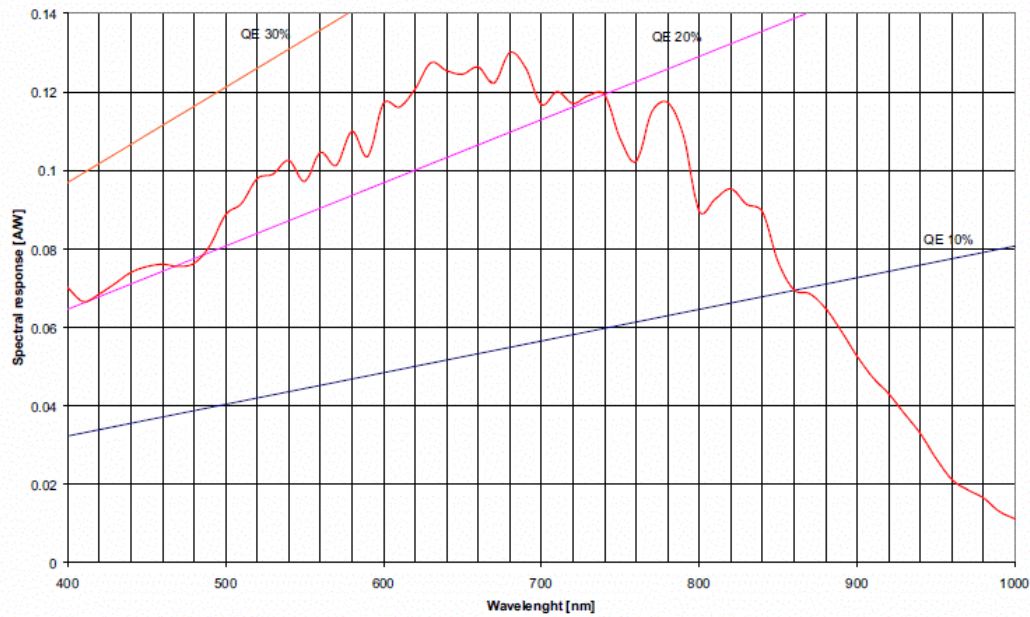
Parameter	Specification	Remarks
FPN (local)	<0.20%	RMS% of saturation signal
PRNU (local)	<1.5%	RMS of signal level
Conversion Gain	Conversion Gain	At output (measured)
Output Signal Amplitude	0.6V	At nominal conditions
Saturation Charge	21.500 e ⁻	
Sensitivity (peak)	411 V.m ² /W.s 4.83 V/lux.s	At 650 nm (85 lux = 1 W/m ²)
Sensitivity (visible)	328 V.m ² /W.s 2.01 V/lux.s	400-700 nm (163 lux = 1 W/m ²)
Peak QE * FF Peak Spectral Response	25% 0.13 A/W	Average QE*FF = 22% (visible range) Average SR*FF = 0.1 A/W (visible range) See the section Spectral Response Curve on page 3.
Fill Factor	35%	Light sensitive part of pixel (measured)
Dark Current	3.37 mV/s 78 e ⁻ /s	Typical value of average dark current of the whole pixel array (at 21°C)
Dark Signal Non Uniformity	8.28 mV/s 191 e ⁻ /s	Dark current RMS value (at 21°C)
Temporal Noise	24 RMS e ⁻	Measured at digital output (in the dark)
S/N Ratio	895:1 (59 dB)	Measured at digital output (in the dark)
Spectral Sensitivity Range	400 - 1000 nm	
Optical Cross Talk	15% 4%	To the first neighboring pixel To the second neighboring pixel
Power Dissipation	190 mW	Typical (including ADCs)

7 - Acquisition et traitement

Les acquisitions sont faites à partir d'un ordinateur de type PC sous Windows XP par un logiciel développé par Jean-Marie Malherbe en visual basic V6, appelant le SDK fourni par PIXELINK. Il génère des fichiers FITS. Ce logiciel est partagé avec la lunette G band.

Un programme développé sous IDL par Jean-Marie Malherbe et intitulé : « CaK.pro » traite les images obtenues et les insère dans BASS2000 automatiquement. Il appelle SAVE2FTP pour les transferts vers BASS2000.

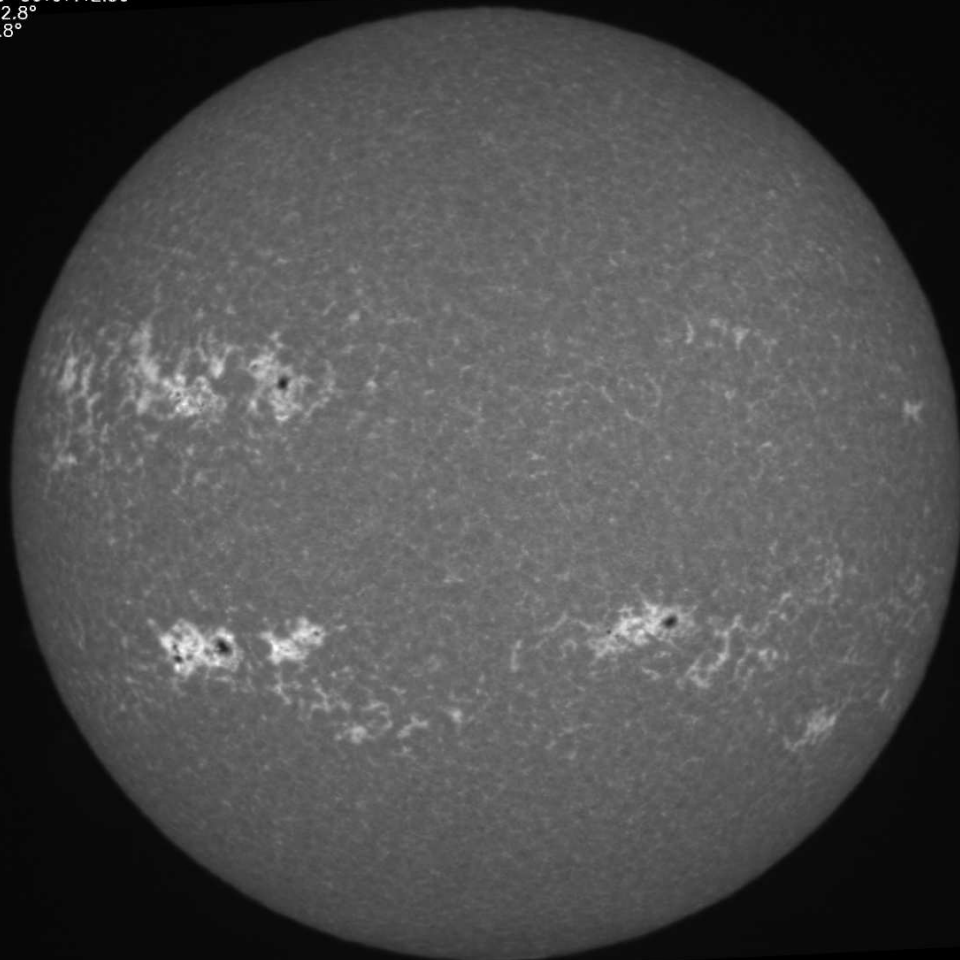
Figure 2. Spectral Response Curve



**Courbe de
réponse
spectrale
de la
caméra :**

20% de
rendement
quantique à
396 nm
dans le
violet.

MEUDON OBSERVATORY
Coil H HELIOGRAPH
396.85 nm filter - 0.12 nm FWHM
2012-06-30T07:42:50
P = -2.8°
B = 2.8°



*Exemple
d'image
obtenue
avec la
lunette*

V - Héliographe de Meudon, lunette Calcium CaII K PICARD sol/CNES

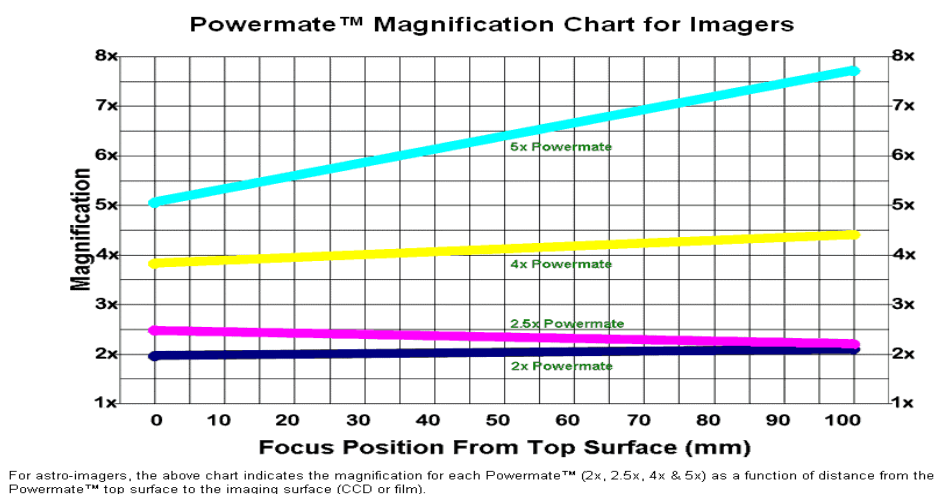


L'objectif de cet instrument est de surveiller l'activité solaire au niveau chromosphérique dans la raie K du Calcium à 393.7 nm (intégration sur le profil au voisinage du coeur de raie)

1 - Instrument

Lunette à trois verres (triplet apochromatique, un verre ED entre deux lentilles crown) de marque Takahashi, modèle TSA102N, D = 102 mm, F = 816 mm.

La focale est doublée par une barlow POWERMATE Televue 2X de 50 mm de diamètre dont le grandissement dépend très peu du tirage (figure).



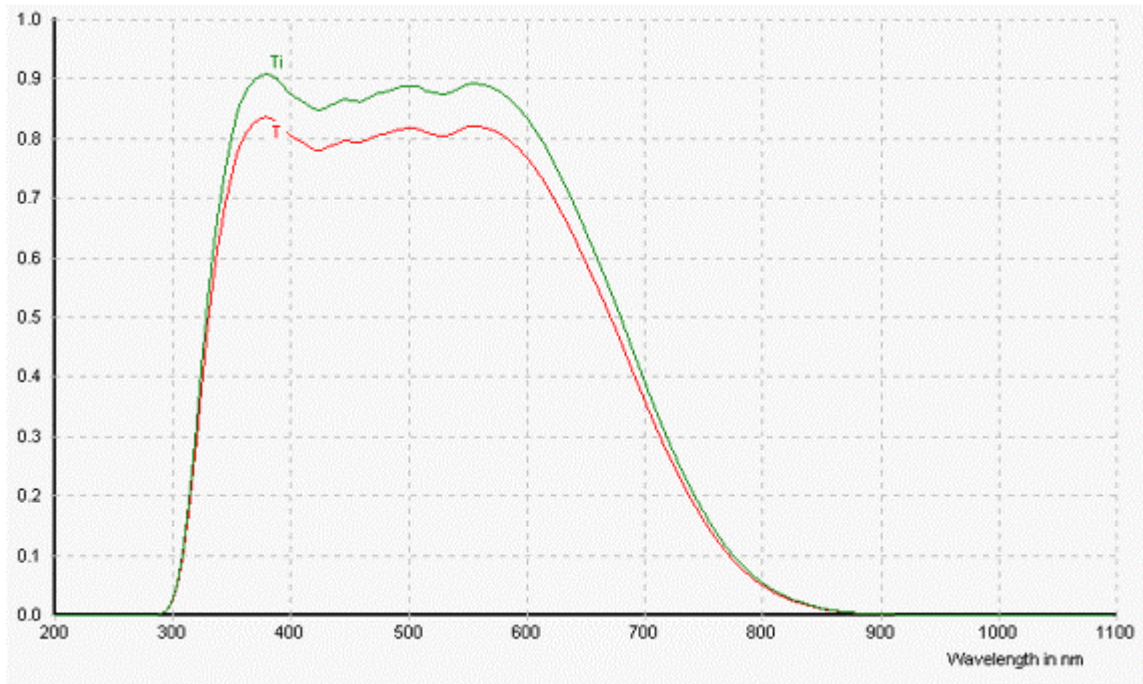
Un filtre anti calorique KG5 d'un diamètre de 70 mm est placé devant l'objectif en pleine ouverture et définit la pupille d'entrée de la lunette (diaphragme).

La lunette a donc 1632 mm de focale pour une ouverture de 70 mm, ce qui nous met à F/23.3. Le demi angle du cône de lumière est derrière la barlow de 1.23°.

Au foyer, le faisceau traverse un filtre Barr Associates centré sur la raie CaII K avec une bande passante de 1.4 Å à mi-hauteur. Ce filtre, de 37 mm de diamètre également, a été acquis en 2009. Il est centré correctement pour la température de 23°C sur 393.37 nm en faisceau collimaté (393.36 pour un cône de demi angle 1.25°, ce qui est le cas effectif). Le constructeur donne une dérive très faible de 0.02 Å par °C de la bande passante.

La lunette est fixée sur la monture équatoriale de l'héliographe à l'aide de colliers. Un moteur de mise au point avec raquette a été installé.

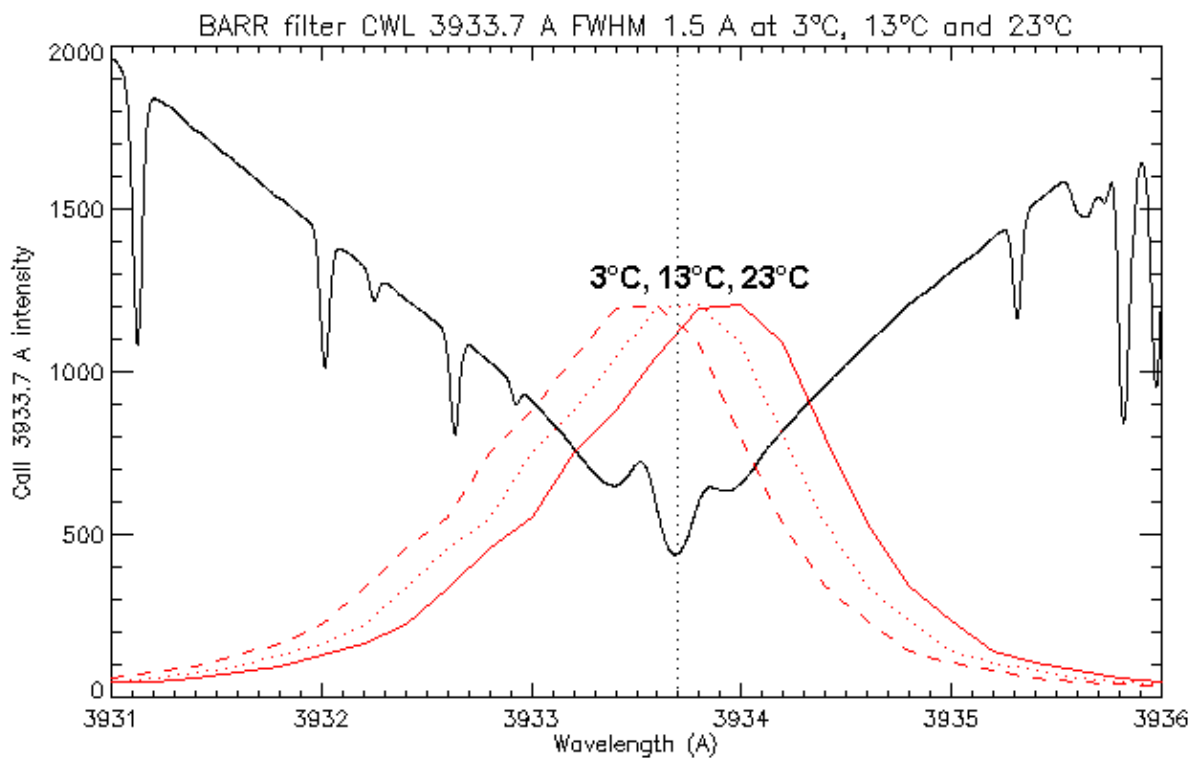
2 - Transmission du filtre anti-calorique KG5 en pleine ouverture



*Transmission du filtre anticalorique SCHOTT KG5 en pleine ouverture
(moins de 10% de transmission au dessus de 770 nm)*

3 - Transmission du filtre Barr au foyer de la lunette à F/23

Le filtre possède un pic de transmission de 60 %. Valeurs et courbe ci dessous.



Observatoire de Paris (PO#: L 24948/CI, Barr#: 53670)

P/N: 393.37/0.15nm

Lot#: 2209

Piece #	1	Blocking 200-1200nm	
CWL_col (nm)	393.37		
CWL_1.25° (nm)	393.36		
FHWM (nm)	0.14		
Peak %T	59.4		
Wavelength (nm)	%T	Wavelength (nm)	OD
393.17	2.29	1133	7.975698
393.18	2.53	1132	8.409338
393.19	3.08	1131	7.683377
393.20	3.46	1130	10
393.21	4.39	1129	10
393.22	4.87	1128	10
393.23	5.97	1127	7.878439
393.24	8.06	1126	7.920002
393.25	9.40	1125	10
393.26	12.29	1124	10
393.27	17.83	1123	10
393.28	22.54	1122	10
393.29	28.24	1121	10
393.30	33.69	1120	7.599898
393.31	41.23	1119	10
393.32	47.37	1118	8.079559
393.33	52.01	1117	7.950217
393.34	56.13	1116	8.131584
393.35	59.03	1115	7.709693
393.36	59.36	1114	7.690992
393.37	59.44	1113	7.749606
393.38	57.12	1112	10
393.39	55.47	1111	8.14064
393.40	50.17	1110	7.920367
393.41	45.12	1109	10
393.42	38.02	1108	10
393.43	32.03	1107	10
393.44	26.10	1106	10
393.45	20.06	1105	10
393.46	15.80	1104	10
393.47	12.29	1103	10
393.48	8.89	1102	7.744316
393.49	6.94	1101	7.998013
393.50	5.74	1100	10
393.51	4.57	1099	10
393.52	3.78	1098	8.034753
393.53	3.22	1097	8.188808
393.54	2.82	1096	7.853619
393.55	2.31	1095	10
393.56	2.22	1094	7.422164
393.57	2.03	1093	10

4 - Résolution spatiale

La résolution théorique est de 1.4 secondes d'arc pour une lunette diaphragmée par le filtre anticalorique à 70 mm.

5 - Echantillonnage

Le soleil mesure en théorie et en moyenne 9.3 mrd soit 15.17 mm au foyer, soit encore 2050 pixels de 7.4 microns (donc à la limite du capteur qui fait 2048 pixels). En Juillet 2012 (le soleil a un diamètre apparent de 1888 arc sec, plus petit que la moyenne), le calcul théorique donne 14.93 mm au foyer soit 2018 pixels. La mesure à partir des observations donne 2030 pixels (excellente concordance), soit **0.93** seconde/pixel en été. On travaille donc avec un léger sous échantillonnage (0.70 arc sec serait idéal), lorsque la qualité d'image est limitée par la résolution de la lunette (probablement bien peu fréquent à Meudon).

6 - Données relatives au capteur et à la caméra

Capteur CCD KAF4022 de KODAK 2048 x 2048 pixels de 7.4 microns

Puits de potentiel maximum = 40000 e⁻

A mi saturation, on a 20000 e⁻ par pixel environ

Bruit de lecture 10 e⁻ à 5 MHz, bruit de photons à mi saturation voisin de 140 e⁻

Bruit global = $(10^2 + 140^2)^{1/2} = 140$ e⁻ à mi saturation

Rapport signal/bruit voisin de 140 à mi saturation soit moins de 1% de bruit dans le signal

Dynamique 40000/10 = 4000 environ (12 bits = 4096 niveaux)

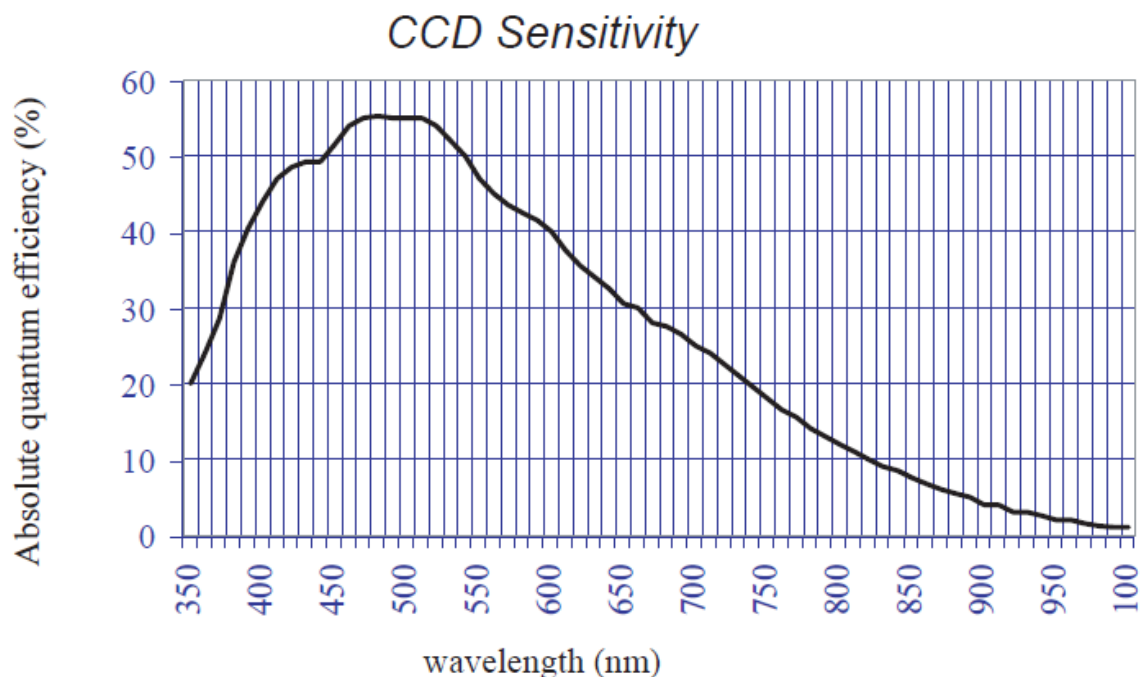
Vitesse de lecture utilisée de 5 MHz

Conversion A/D: 10 e⁻ par ADU

Temps de pose voisin de quelques dizaines de ms (dark très faible)

Refroidissement par effet Peltier + ventilateur

Caméra CCD de marque APOGEE, modèle U4000



40 % de rendement quantique à 400 nm

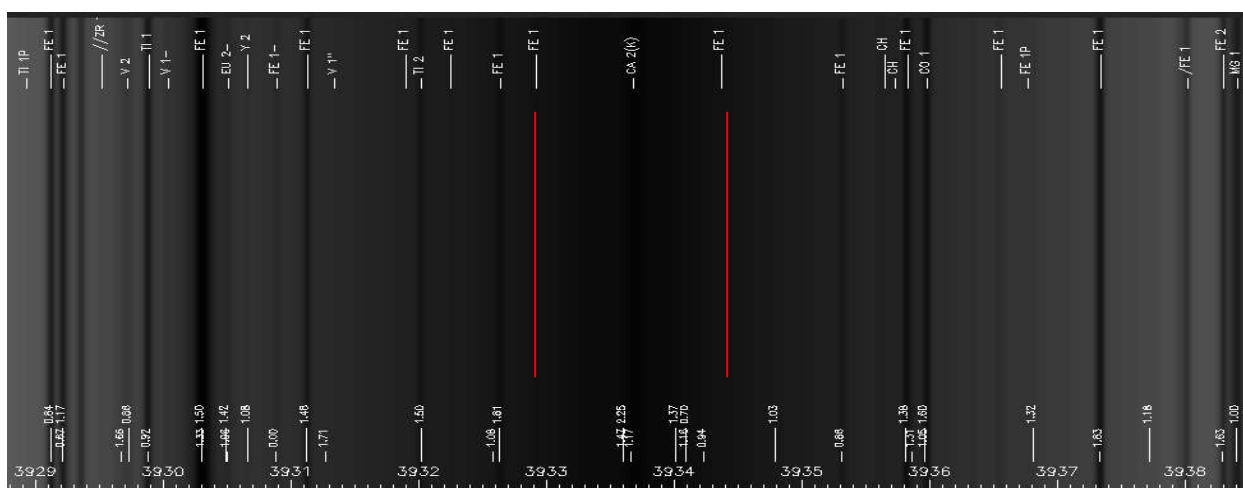
CCD	Kodak KAI-4020M
Array Size (pixels)	2048 x 2048
Pixel size	7.4 x 7.4 microns
Imaging area	15.15 x 15.15 mm (229.7 mm ²)
Imaging diagonal	21.43 mm
Linear Full Well (typ.)	40,000 e ⁻
Dynamic Range	> 77 dB
QE @ 400 nm	45%
Peak QE (500 nm)	55%

PC Interface	USB 2.0
Max. cable length	5 meters between hubs; 5 hubs maximum (max. total of 30m)
Digital resolution	12 bits at 5 MHz and 16 bits at 1 MHz
System Noise (typ.)	15 e ⁻ RMS at 10 MHz; 8 e ⁻ RMS at 1 MHz
Pixel Binning	1x1 to 10 x 2048 on-chip
Exposure Time	50 microseconds to 183 minutes (2.56 microsecond increments)
Image Sequencing	1-65535 image sequences under software control
Frame Sizes	Full frame, subframe, focus mode
Cooling	Thermoelectric cooler with forced air. Maximum cooling 45° C below ambient temperature. Programmable fan speed.
Dark Current (nom.)	0.2 e ⁻ /pixel/sec (-25° C)
Temperature Stability	±0.1° C
Camera Head Size	Standard: D2 w/ no shutter. Low profile: D6. Aluminum, hard blue anodized and nickel plated. 6" x 6" x 2.1" (15 x 15 x 6.25 cm). Weight: 3.1 lb. (1.4 kg)
Mounting	3.5" bolt circle. 2" 24 threads-per-inch. Optional Nikon or Canon lens mount.
Back focal distance	Standard: 1.025" (2.60 cm). Low profile: 0.456" (1.158 cm) [optical]
Operating Environment	Temperature: -22° to 27°C. Relative humidity 10 to 90% noncondensing
Cable length	Standard: 15 ft (4.5m)
Power	40W maximum power with cooling maximum. Power supplied by AC/DC "brick" supply with international AC input plug. Alternate 12V input for user's source.
Shutter	Electronic (optional electromechanical shutter)
Remote Triggering	LVTTL input to camera allows exposure start within 25 microseconds of rising edge of trigger

7 - Acquisition et traitement

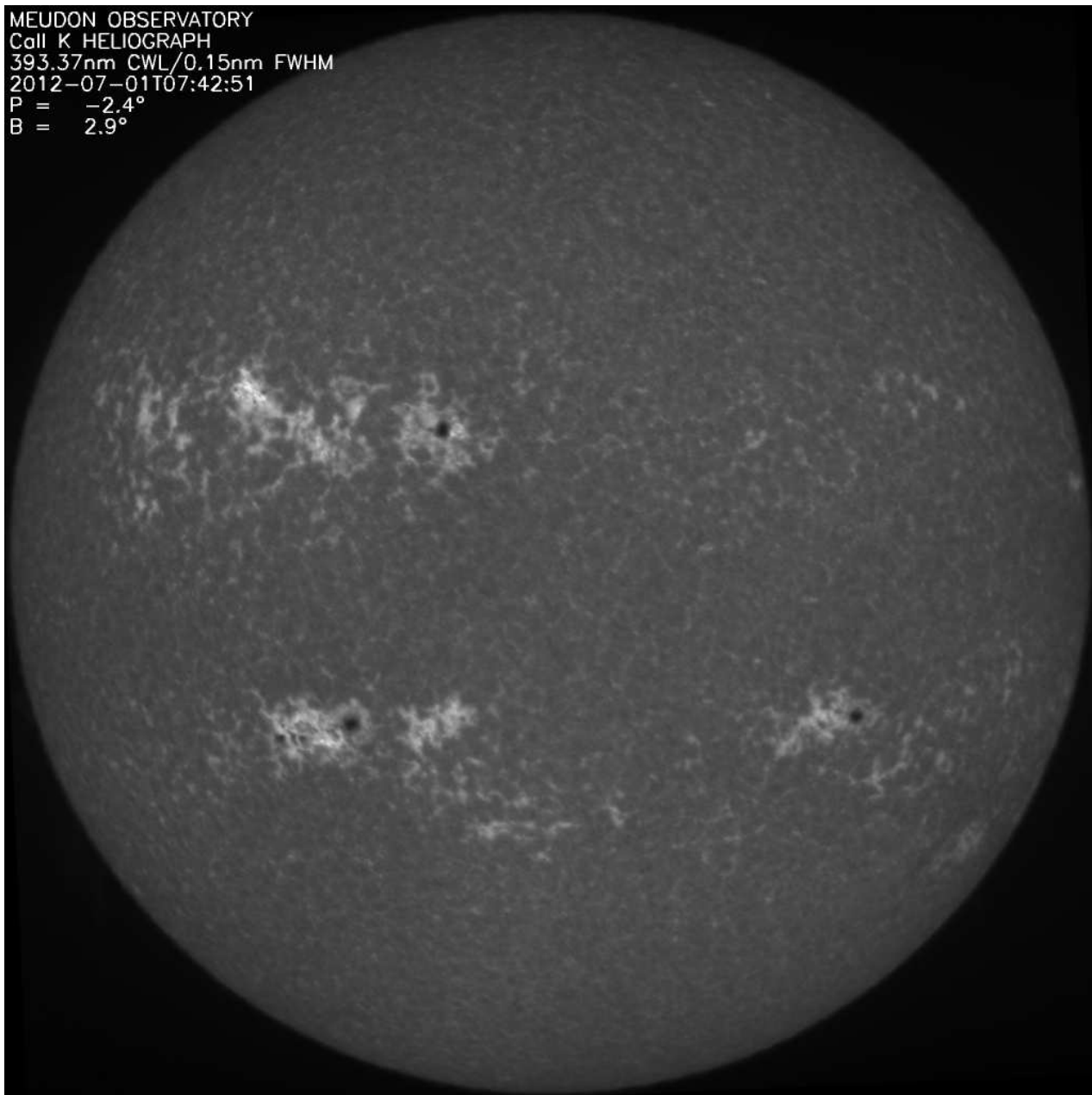
Les acquisitions sont faites à partir d'un ordinateur de type PC sous Windows XP par le logiciel commercial MAXIM DL. Il génère des fichiers FITS.

Un programme développé sous IDL par Jean-Marie Malherbe et intitulé : « CaK.pro » traite les images obtenues et les insère dans BASS2000 automatiquement.



Raie Ca II K - Le filtre sélectionne 1.4 Å FWHM (bande à mi hauteur indiquée)

MEUDON OBSERVATORY
Call K HELIOGRAPH
393.37nm CWL/0.15nm FWHM
2012-07-01T07:42:51
P = -2.4°
B = 2.9°



Exemple d'image obtenue avec la lunette

VI - Héliographe de Meudon, lunette continu vert (instrument interrompu)



Cet instrument a pour but de surveiller l'activité solaire au niveau photosphérique dans le continu vert autour de 530.2 nm (intégration sur peu de raies)

1 - Instrument 1

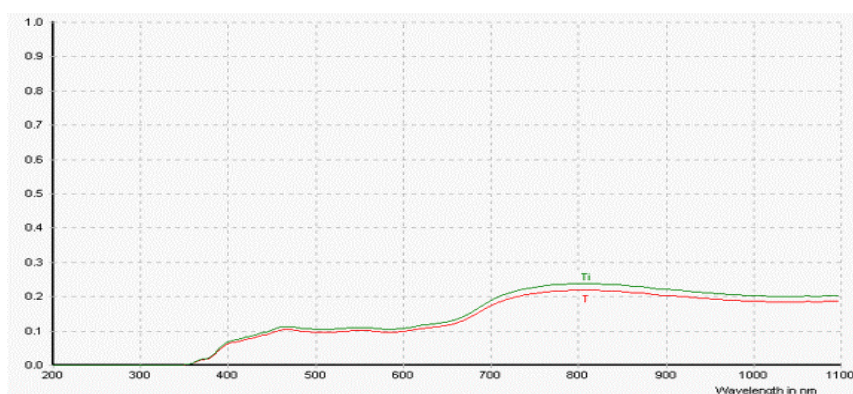
Le premier instrument était un objectif SIGMA de 400 mm de focale avec un multiplicateur x 1.4, donnant une focale $F = 560$ mm avec un filtre Andover Corporation installé en pleine ouverture. L'instrument 2 lui a vite succédé, et nous ne présenterons que cette configuration dans les détails.

2 - Instrument 2

Lunette à deux verres ED (doublet apochromatique) de marque Vixen, modèle ED80SF, $D = 80$ mm, $F = 600$ mm.

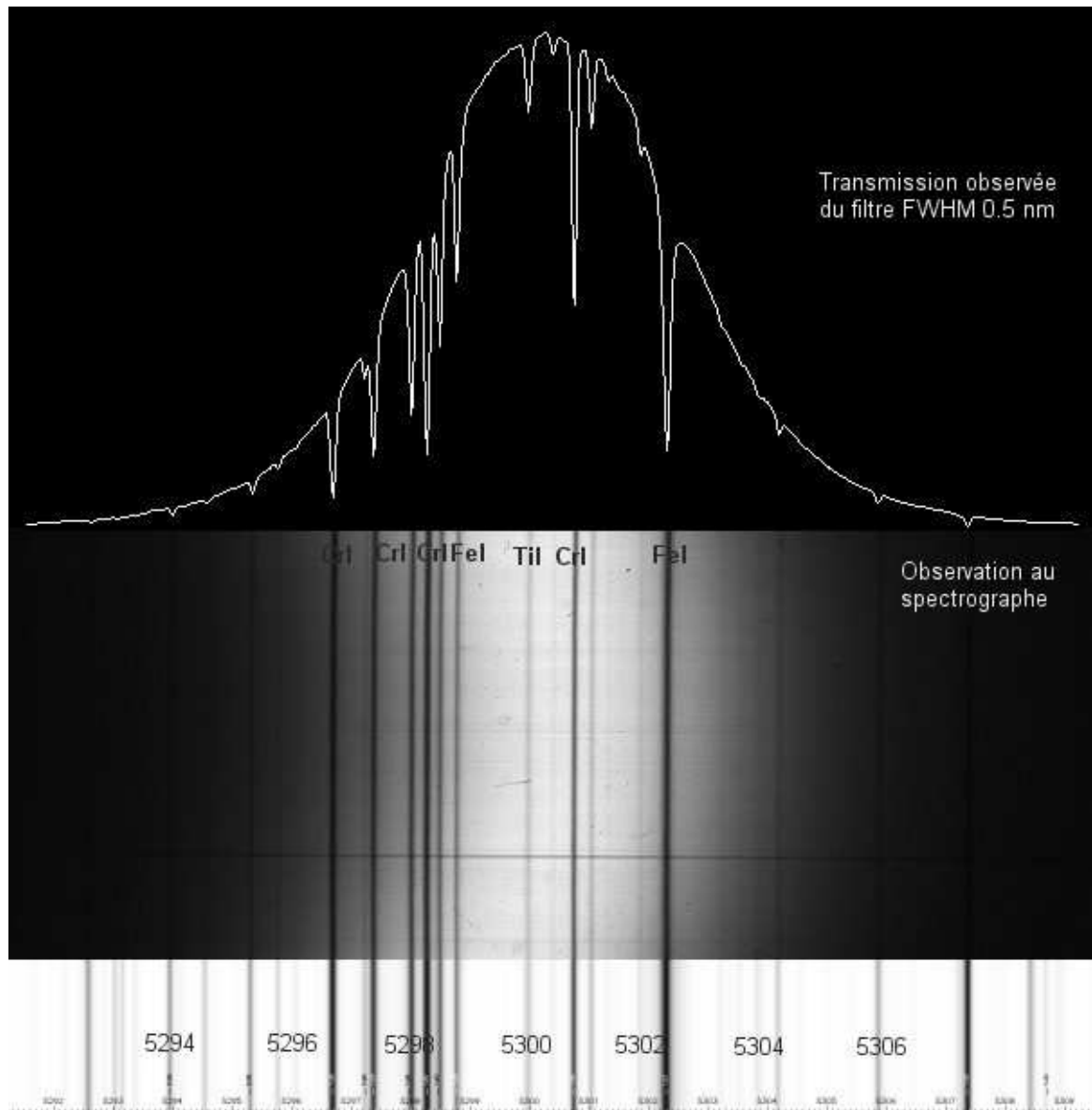
Une densité neutre ND1 carrée 50 x 50 mm est placée devant l'objectif en pleine ouverture et suivie d'un diaphragme de 50 mm de diamètre. Ce diaphragme définit la pupille d'entrée de la lunette. La lunette travaille donc en réalité à $F/12$ (demi angle du cône de lumière = 2.4°).

Un filtre interférentiel Andover Corporation avec une bande passante de 5 Å à mi-hauteur est placé en pleine ouverture derrière la densité neutre. Ce filtre fait 50 mm de diamètre également. Il est centré correctement pour la température de 23°C . Le constructeur donne une dérive de 0.1 Å environ par $^\circ\text{C}$ de la bande passante.



Courbe de transmission de la densité neutre en pleine ouverture SCHOTT

3 - Transmission du filtre Andover Corporation mesurée au spectrographe



4 - Résolution spatiale

La résolution théorique est de 2.7 secondes d'arc pour une lunette diaphragmée à 50 mm.

5 - Echantillonnage

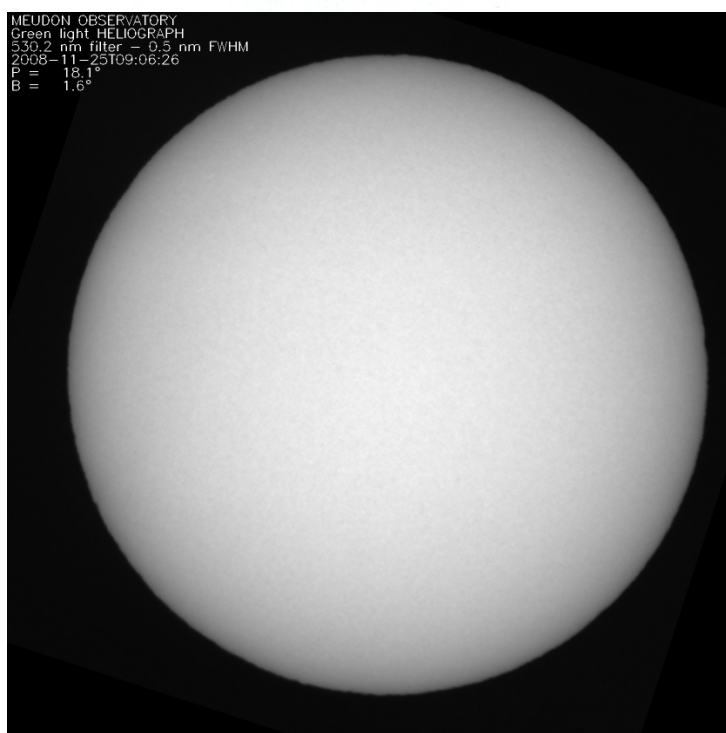
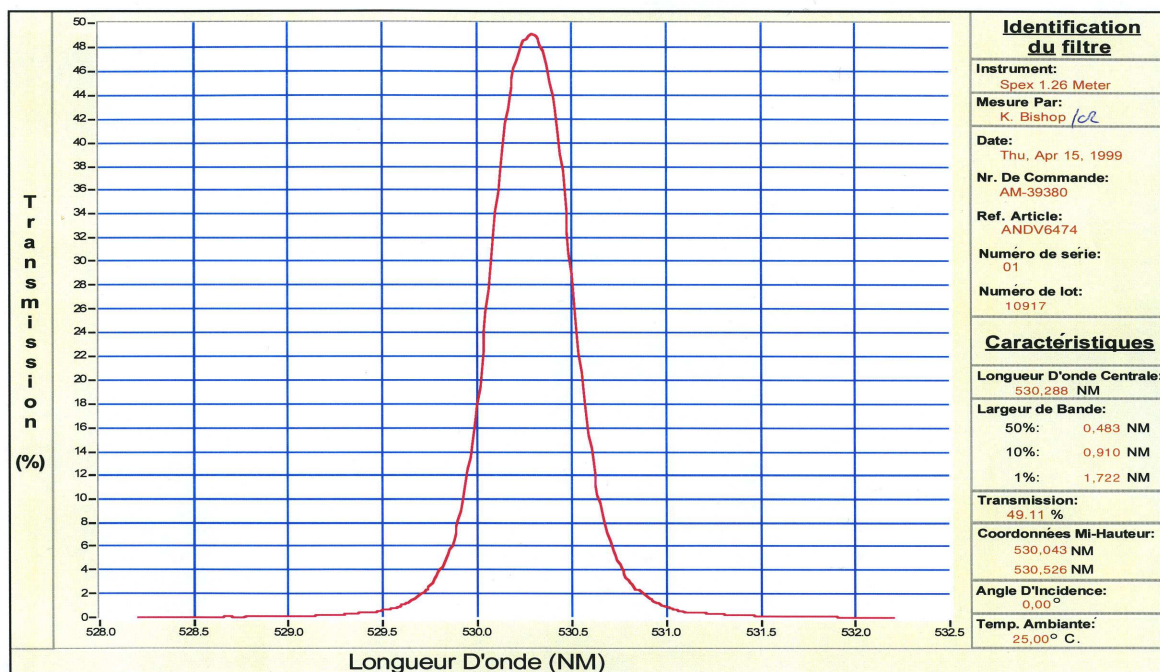
Le soleil mesure en théorie et en moyenne 5.58 mm au foyer de la lunette 2, soit 1594 pixels de 3.5 microns. En hiver (le soleil a un diamètre apparent plus grand en automne/hiver) le calcul théorique donne 5.66 mm soit 1617 pixels. La mesure avec la lunette 1 donne 1470 pixels et avec la lunette 2 donne 1575 pixels, soit **1.25** seconde/pixel pour cette dernière. On travaille donc avec un échantillonnage parfait (1.35 arc sec serait théoriquement idéal), lorsque la qualité d'image est limitée par la résolution de la lunette (probablement bien peu fréquent).

6 - Données relatives au capteur :

Capteur CMOS IBIS 6600 de CYPRESS
Puits de potentiel maximum = 21500 e⁻

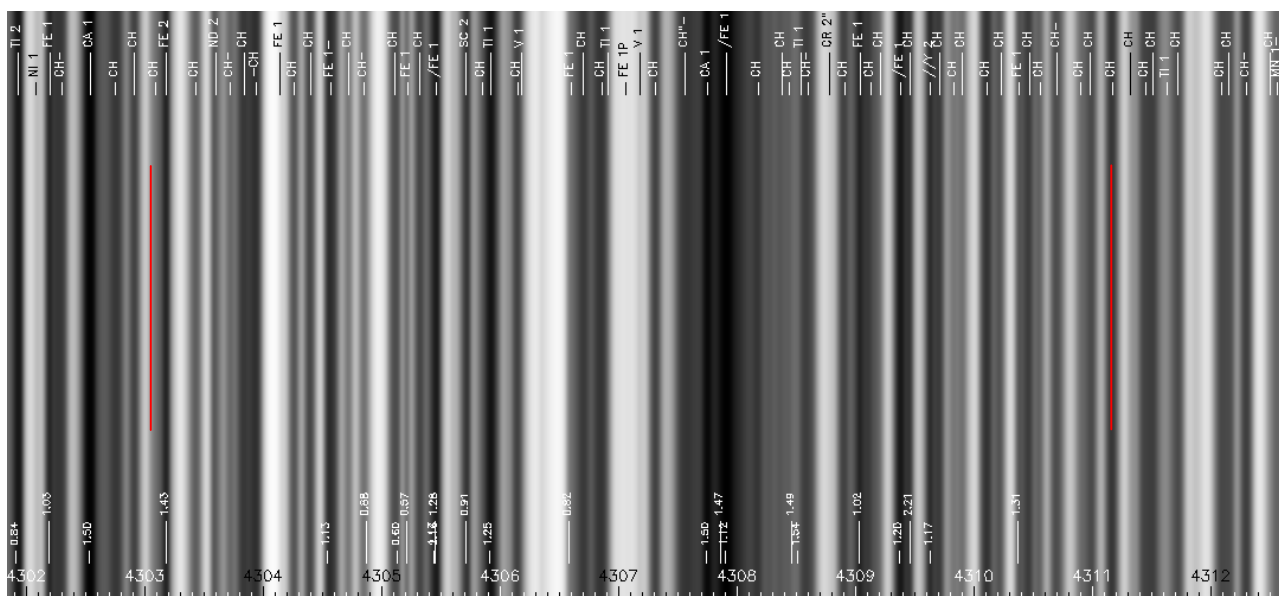
A mi saturation, on a 10000 e⁻ par pixel environ
 Bruit de lecture 24 e⁻, bruit de photons à mi saturation voisin de 100 e⁻
 Bruit global = $(24^2 + 100^2)^{1/2} = 103 \text{ e}^-$ à mi saturation
 Rapport signal/bruit voisin de 100 à mi saturation soit 1% de bruit dans le signal
 Dynamique 21500/24 = 900 (10 bits = 1024 niveaux)
 Conversion A/D: 21 e⁻ par ADU
 Temps de pose voisin de quelques dizaines de ms (dark très faible)
 Rendement quantique voisin de 23 % à 530 nm
 Caméra CMOS de marque Pixelink, modèle PL-B781F
 Spécifications identiques à celles données page 24.

L.O.T. - Oriel



*Exemple
d'image
obtenue
avec la
lunette*

VII - Héliographe de Meudon, lunette Bande G



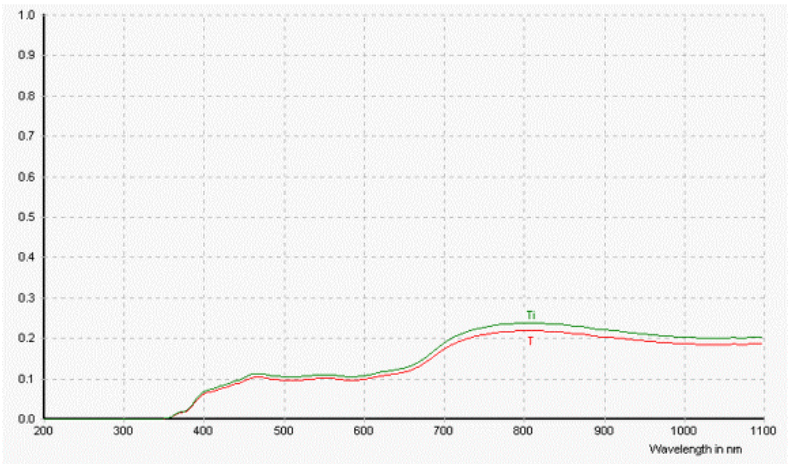
La lunette a pour but de surveiller l'activité solaire au niveau photosphérique dans la bande moléculaire de la molécule CH, baptisée G, autour de 430.7 nm (intégration sur un grand nombre de raies, voir spectre ci dessus, sur une largeur de 8 Å à mi hauteur indiquée par les bornes rouges)

1 - Instrument

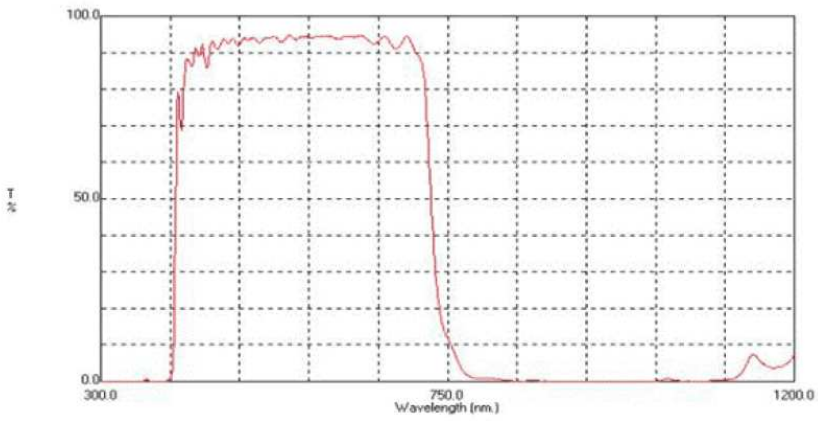
Lunette à deux verres ED (doublet apochromatique) de marque Vixen, modèle ED80SF, D = 80 mm, F = 600 mm. Une densité neutre ND1 carrée 50 x 50 mm est placée devant l'objectif en pleine ouverture et suivie d'un diaphragme de 50 mm de diamètre. Ce diaphragme définit la pupille d'entrée de la lunette. La lunette travaille donc en réalité à F/12 (demi angle du cône de lumière = 2.4°).

Au foyer, le faisceau traverse un filtre anticalorique MTO Athervex réfléchissant le rayonnement IR (point or côté source) de 50 mm de diamètre placé devant un filtre interférentiel Andover Corporation centré sur la bande G avec une bande passante de 8 Å à mi-hauteur. Ce filtre mesure 50 mm de diamètre également. Il est centré correctement pour la température de 23°C. Le constructeur donne une dérive très faible de 0.1 Å environ par °C de la bande passante.

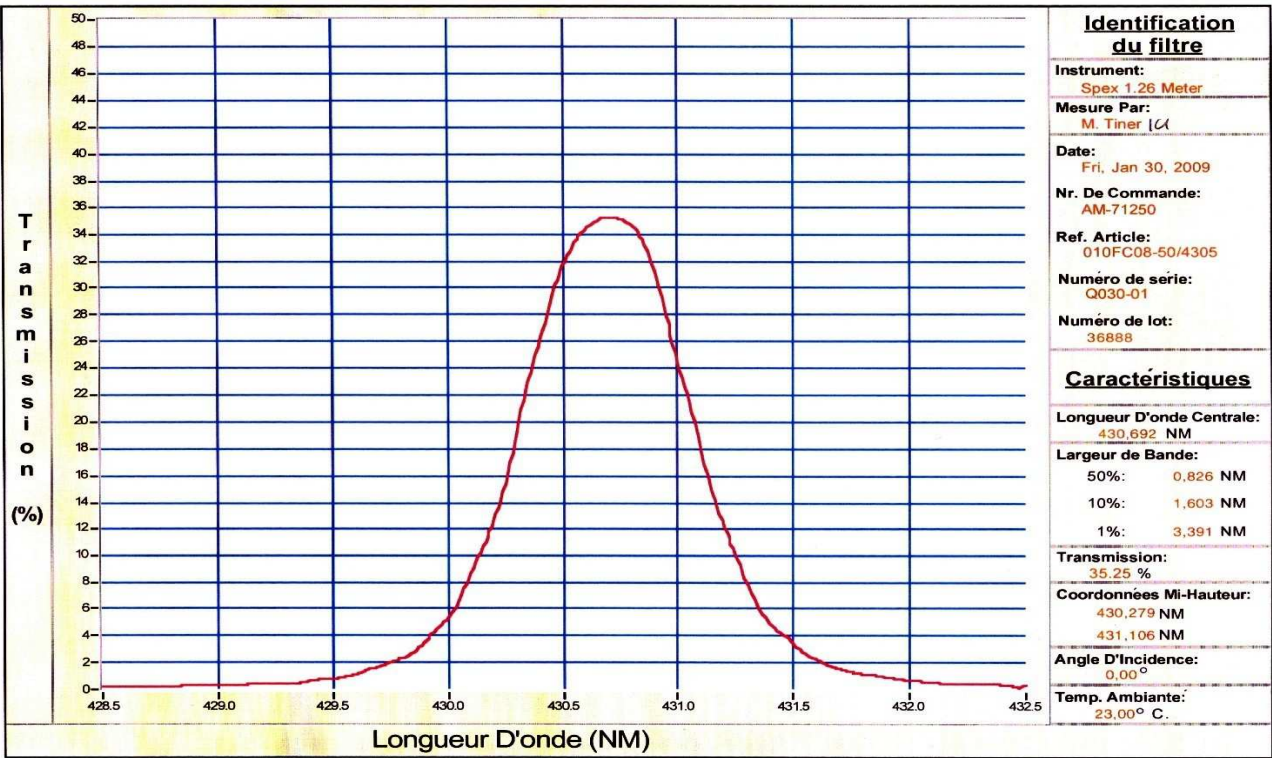
2 - Transmission de la densité neutre en pleine ouverture SCHOTT



3 - Transmission du filtre anti-calorique par réflexion ATHERVEX MTO



4 - Courbe de transmission du filtre interférentiel Andover Corporation



5 - Résolution spatiale

La résolution théorique est de 2.2 secondes d'arc pour une lunette diaphragmée à 50 mm.

6 - Echantillonnage

Le soleil mesure en théorie et en moyenne 5.58 mm au foyer, soit 1594 pixels de 3.5 microns. En Janvier 2012 (le soleil a un diamètre apparent plus grand en hiver) le calcul théorique donne 5.67 mm soit 1620 pixels. La mesure à partir des observations donne 1690 pixels (concordance médiocre), soit **1.15** seconde/pixel en hiver. On travaille donc avec un échantillonnage parfait (1.1 arc sec serait théoriquement idéal), lorsque la qualité d'image est limitée par la résolution de la lunette (probablement bien peu fréquent).

7 - Données relatives au capteur et à la caméra

Capteur CMOS IBIS 6600 de CYPRESS

Puits de potentiel maximum = 21500 e⁻

A mi saturation, on a 10000 e⁻ par pixel environ

Bruit de lecture 24 e⁻, bruit de photons à mi saturation voisin de 100 e⁻

Bruit global = $(24^2 + 100^2)^{1/2} = 103$ e⁻ à mi saturation

Rapport signal/bruit voisin de 100 à mi saturation soit 1% de bruit dans le signal

Dynamique 21500/24 = 900 (10 bits = 1024 niveaux)

Conversion A/D: 21 e⁻ par ADU

Temps de pose voisin de quelques dizaines de ms (dark très faible)

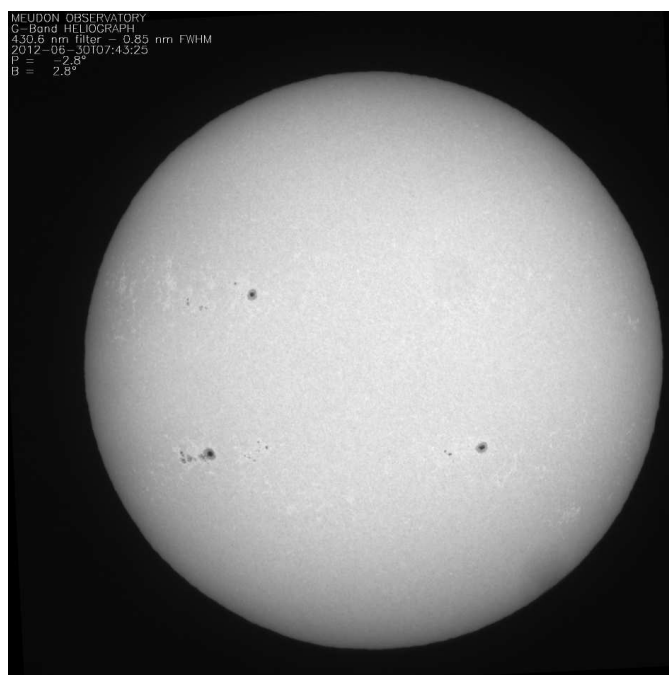
Caméra CMOS de marque Pixelink, modèle PL-B781F, 20 % de rendement quantique à 430 nm

Spécifications et caractéristiques données page 24.

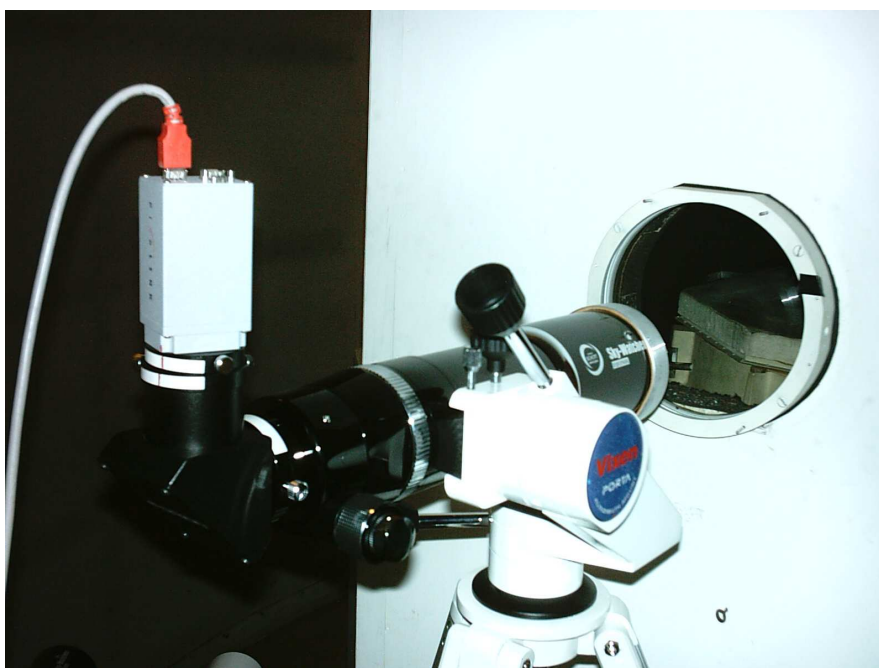
8 - Acquisitions et traitement

Les acquisitions sont faites à partir d'un ordinateur de type PC sous Windows XP par un logiciel développé en visual basic V6, appelant le SDK fourni par PIXELINK. Il génère des fichiers FITS. Ce logiciel est partagé avec la lunette CaII H. Un programme développé sous IDL par Jean-Marie Malherbe traite les images obtenues et les insère dans BASS2000 automatiquement.

*Exemple
d'image
produite en
bande G*



VIII - Tour Solaire de Meudon, lunette Calcium CaII K de secours

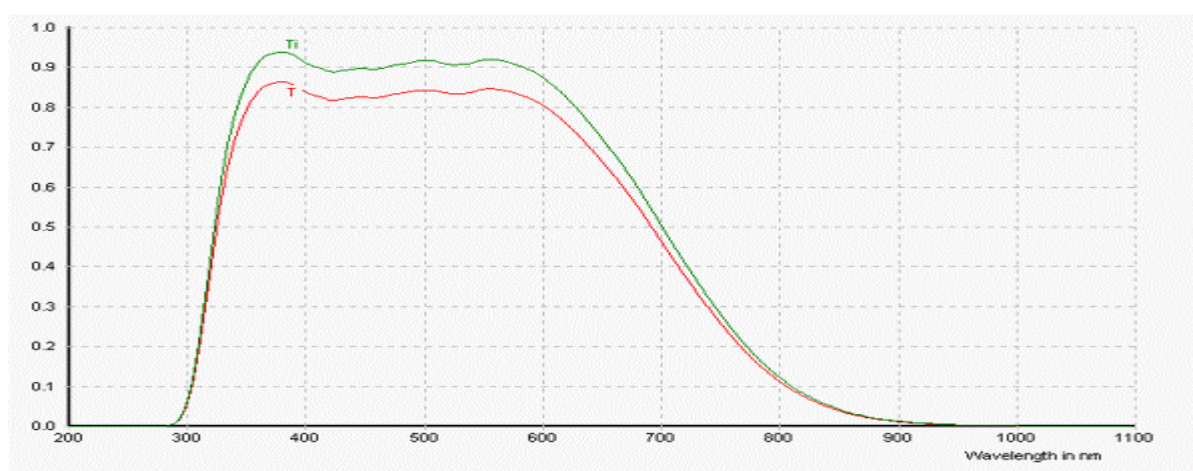


Le but de cette lunette de secours est de surveiller l'activité solaire au niveau chromosphérique dans la raie K du Calcium à 393.37 nm (intégration sur le profil au voisinage du coeur de raie).

1 - Instrument

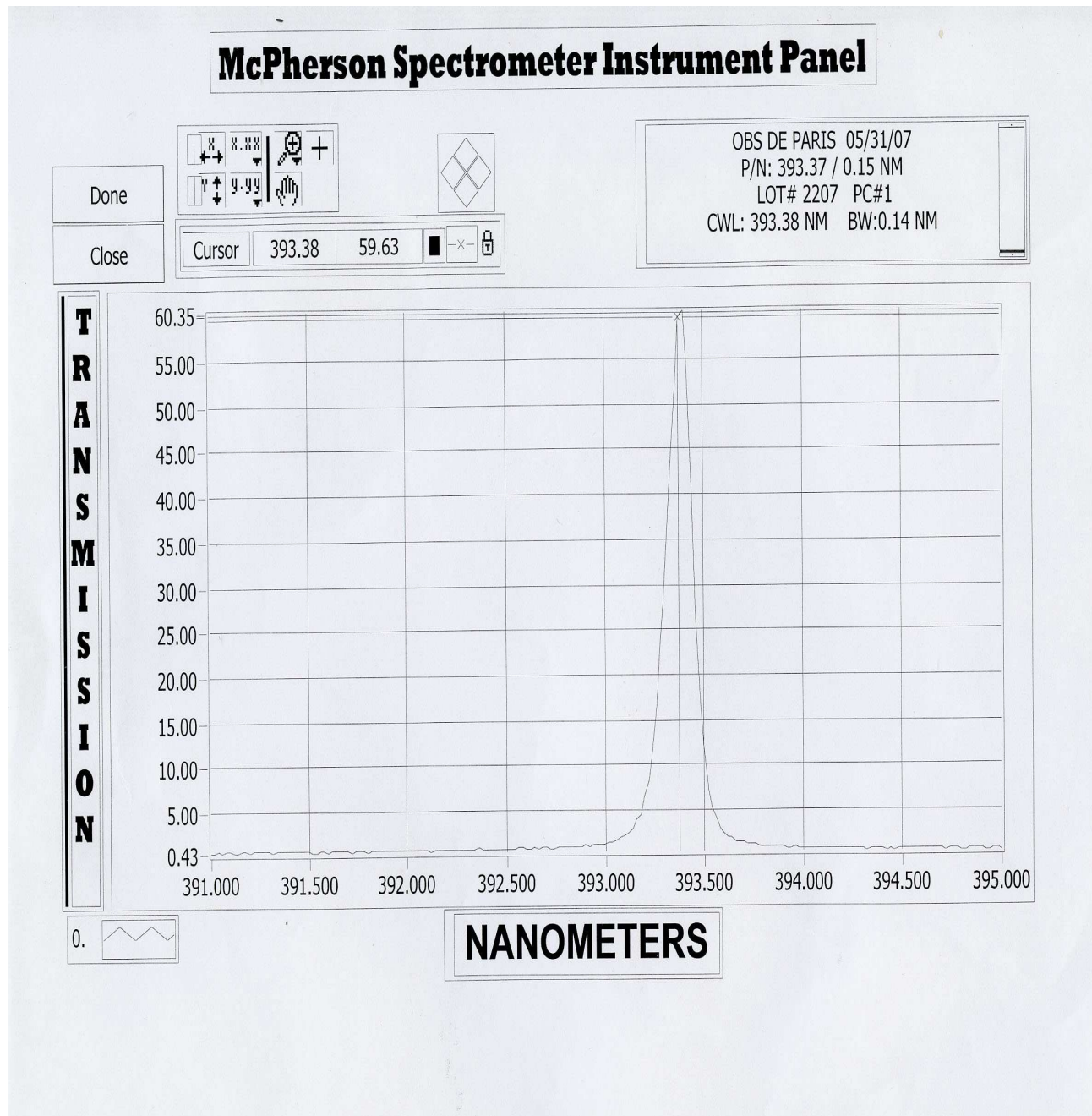
Lunette de marque SkyWatcher, modèle Equinox 80 ED, $D = 80$ mm, $F = 500$ mm. Un filtre anti calorique KG3 d'un diamètre de 50 mm placé devant l'objectif définit la pupille de la lunette. Le faisceau est replié par un renvoi coudé à miroir plan puis traverse un filtre Barr Associates centré sur la raie K avec une bande passante de $1.4 \text{ \AA}$ à mi-hauteur. Le filtre mesure 25 mm de diamètre. Ce filtre est centré correctement pour la température de 23°C , ce qui est le cas au RDC de la Tour Solaire de Meudon. Le constructeur donne une dérive très faible de $0.02 \text{ \AA}$ par $^\circ\text{C}$. La lunette est fixée sur une monture azimutale et vise un miroir plan qui reçoit la lumière depuis le cœlostate de la terrasse de la tour solaire.

2 - Transmission du filtre anti-calorique KG3 en pleine ouverture



Le filtre coupe l'IR à partir de 800 nm (transmission < 10 %)

3 - Transmission du filtre interférentiel Barr (0.14 nm de largeur à mi hauteur)



4 - Résolution spatiale

La résolution théorique est de 2.0 secondes d'arc pour une lunette diaphragmée par le filtre anticalorique à 50 mm.

5 - Echantillonnage

Le soleil mesure en théorie et en moyenne 4.65 mm au foyer, soit 1330 pixels de 3.5 microns. En Janvier 2013 (le soleil a un diamètre apparent plus grand en hiver) le calcul théorique donne 4.73 mm soit 1351 pixels. La mesure à partir des observations donne 1362 pixels (très bonne concordance), soit 1.7 seconde/pixel en hiver. On travaille donc avec un sous échantillonnage (1.0 arc sec serait idéal), lorsque la qualité d'image est limitée par la résolution de la lunette (probablement peu fréquent).

6 - Données relatives au capteur et à la caméra

Capteur CMOS IBIS 6600 de CYPRESS

Puits de potentiel maximum = 21500 e⁻

A mi saturation, on a 10000 e⁻ par pixel environ

Bruit de lecture 24 e⁻, bruit de photons à mi saturation voisin de 100 e⁻

Bruit global = $(24^2 + 100^2)^{1/2} = 103 \text{ e}^-$ à mi saturation

Rapport signal/bruit voisin de 100 à mi saturation soit 1% de bruit dans le signal

Dynamique 21500/24 = 900 (10 bits = 1024 niveaux)

Conversion A/D: 21 e⁻ par ADU

Temps de pose voisin de 50 ms (dark très faible)

caméra CMOS de marque Pixelink, modèle PL-B781F

General Specifications

Parameter	Specification	Remarks
Pixel Architecture	3T-Pixel	
Pixel Size	3.5 µm x 3.5 µm	The resolution and pixel size results in a 7.74 mm x 10.51 mm optical active area.
Resolution	2210 x 3002	
Pixel Rate	40 MHz	Using a 40 MHz system clock and 1 or 2 parallel outputs
Shutter Type	Electronic Rolling Shutter	
Full Frame Rate	5 frames/second	Increases with ROI read out and/or subsampling

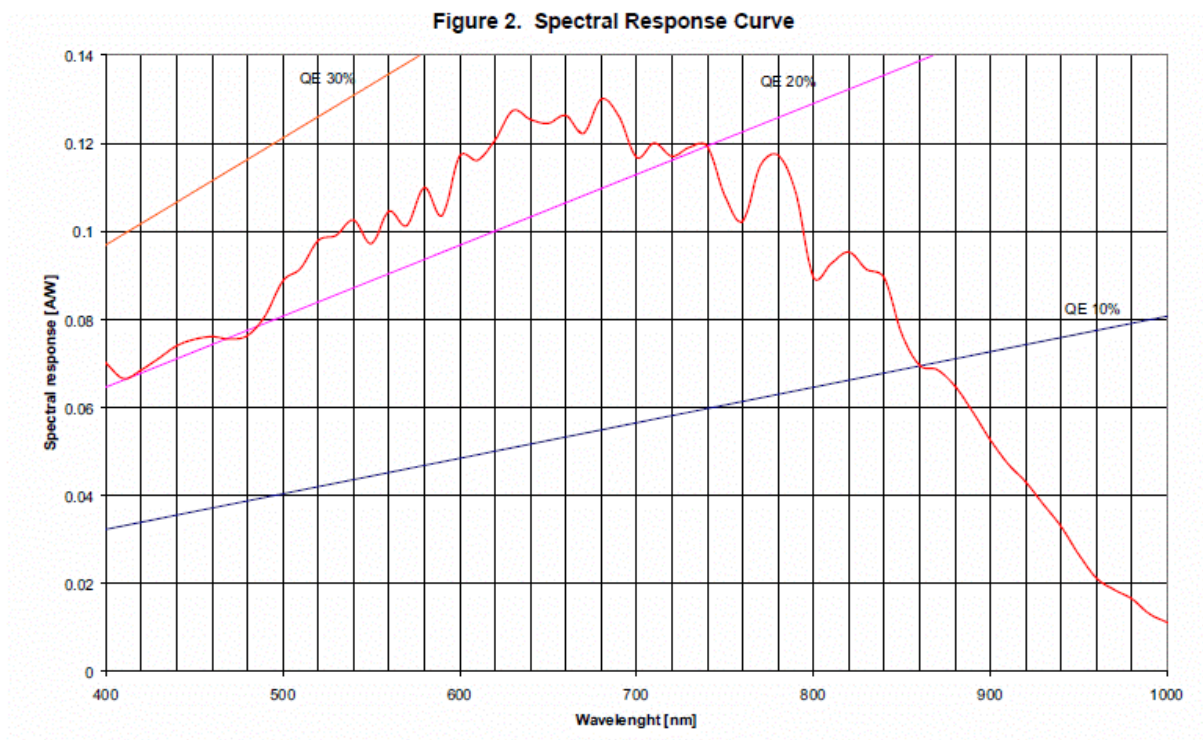
Electro Optical Specifications

Parameter	Specification	Remarks
FPN (local)	<0.20%	RMS% of saturation signal
PRNU (local)	<1.5%	RMS of signal level
Conversion Gain	Conversion Gain	At output (measured)
Output Signal Amplitude	0.6V	At nominal conditions
Saturation Charge	21.500 e ⁻	
Sensitivity (peak)	411 V.m ² /W.s 4.83 V/lux.s	At 650 nm (85 lux = 1 W/m ²)
Sensitivity (visible)	328 V.m ² /W.s 2.01 V/lux.s	400-700 nm (163 lux = 1 W/m ²)
Peak QE * FF Peak Spectral Response	25% 0.13 A/W	Average QE*FF = 22% (visible range) Average SR*FF = 0.1 A/W (visible range) See the section Spectral Response Curve on page 3.
Fill Factor	35%	Light sensitive part of pixel (measured)
Dark Current	3.37 mV/s 78 e ⁻ /s	Typical value of average dark current of the whole pixel array (at 21°C)
Dark Signal Non Uniformity	8.28 mV/s 191 e ⁻ /s	Dark current RMS value (at 21°C)
Temporal Noise	24 RMS e ⁻	Measured at digital output (in the dark)
S/N Ratio	895:1 (59 dB)	Measured at digital output (in the dark)
Spectral Sensitivity Range	400 - 1000 nm	
Optical Cross Talk	15% 4%	To the first neighboring pixel To the second neighboring pixel
Power Dissipation	190 mW	Typical (including ADCs)

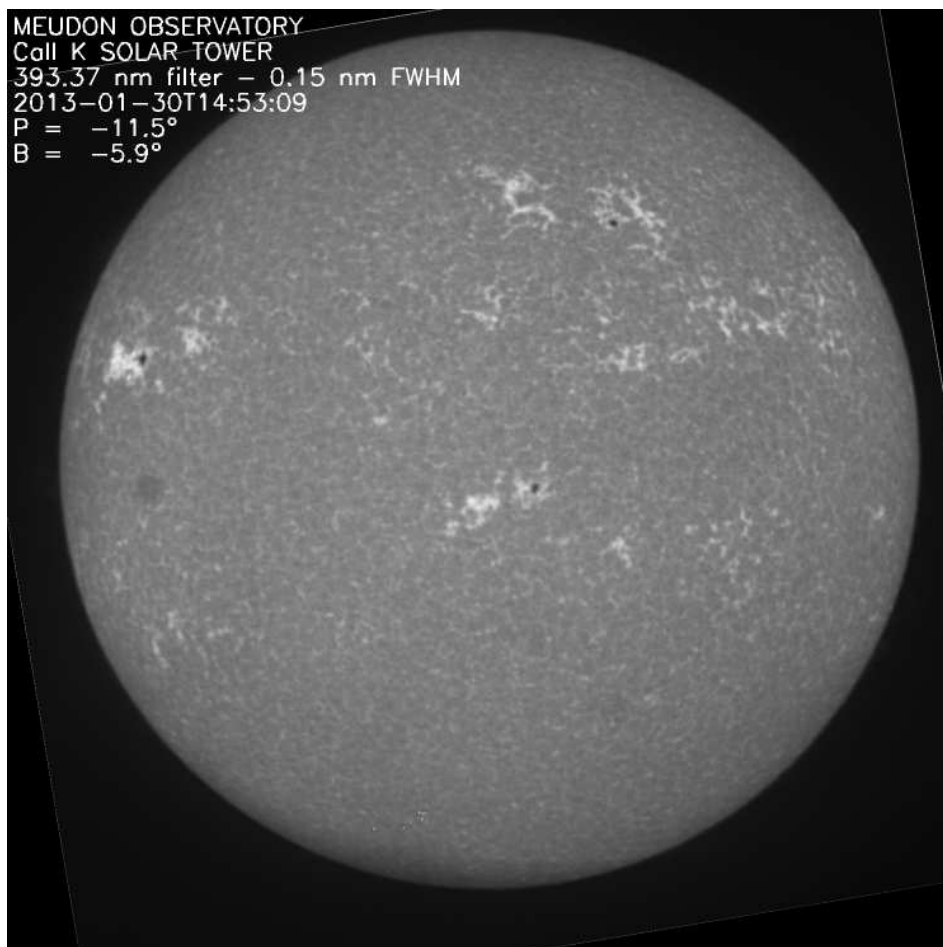
7 - Acquisitions et traitement

Les acquisitions sont faites à partir d'un ordinateur de type PC sous Windows XP par un logiciel développé en visual basic V6. Des rafales (100 images) sont acquises en RAW. La série d'images est ensuite traitée par le logiciel : « Registax » qui génère une image FIT, résultat du "stacking". Un

programme, développé sous IDL par Jean-Marie Malherbe traite les images obtenues et les insère dans BASS2000.

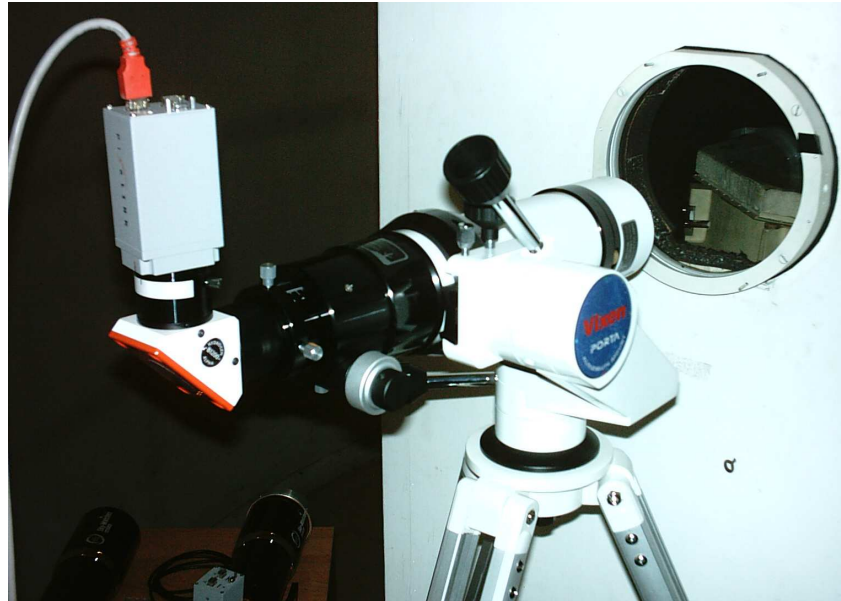


20% de rendement quantique à 393 nm dans le violet à 400 nm et exemple d'image



*exemple
d'image
obtenue
avec la
lunette*

IX - Tour Solaire de Meudon, lunette H α de secours



L'objet de cette lunette est la surveillance de l'activité solaire au niveau chromosphérique dans la raie H α à 656.3nm.

1 - Instrument

Lunette complète de marque Lunt équipée d'une filtration par un interféromètre de type Fabry-Pérot à double étage. La lumière traverse un premier élément F.P. de 50 mm de diamètre qui a des cannelures de 0.7 Å, puis entre dans l'objectif de diamètre 60 mm, F=500 mm. Dans le corps de l'instrument une lentille divergente redresse le faisceau qui pénètre dans un second élément F.P. puis une lentille convergente redonne la vergence initiale au faisceau. Un filtre bloque les IR avant que le faisceau ne soit replié par un miroir plan puis au niveau de l'image un filtre interférentiel de 12 mm de diamètre sélectionne la cannelure au niveau de la raie H α . Ce filtre a une bande passante de quelques Angströms. La lunette est fixée sur une monture azimutale et vise un miroir plan qui reçoit la lumière depuis le cœlostat de la terrasse de la tour solaire.

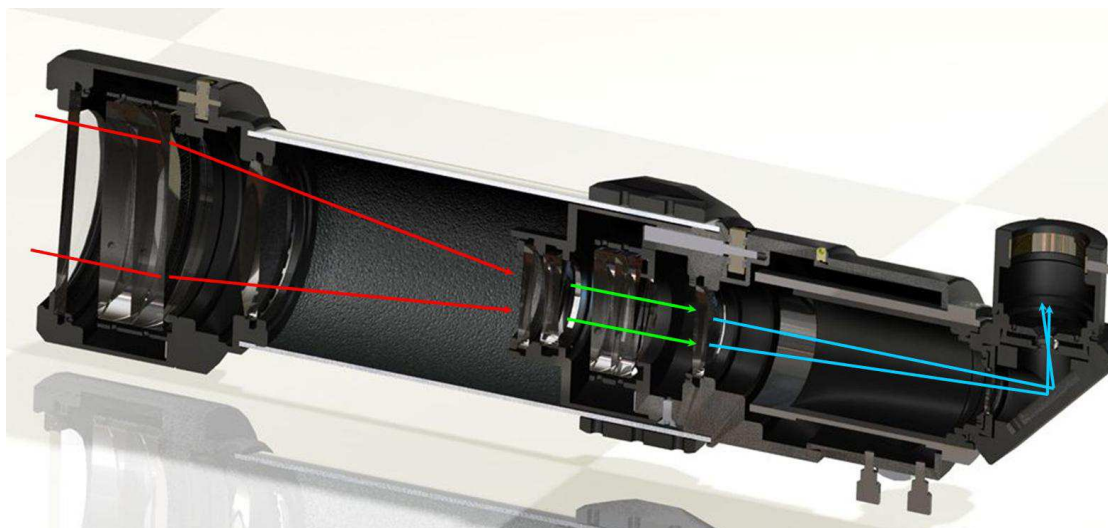


Image de la société Lunt

2 - Résolution spatiale

La résolution théorique est de 3 secondes d'arc.

3 - Echantillonnage

Le soleil mesure en théorie et en moyenne 4.65 mm au foyer, soit 1330 pixels de 3.5 microns. En Janvier 2013 (le soleil a un diamètre apparent plus grand en hiver) le calcul théorique donne 4.73 mm soit 1351 pixels. La mesure à partir des observations donne 1362 pixels (très bonne concordance), soit 1.7 seconde/pixel en hiver (valeur proche de la moitié de la résolution).

4 - Données relatives au capteur et à la caméra

Capteur CMOS IBIS 6600 de CYPRESS

Puits de potentiel maximum = 21500 e⁻

A mi saturation, on a 10000 e⁻ par pixel environ

Bruit de lecture 24 e⁻, bruit de photons voisin de 100 e⁻

Dynamique 21500/24 = 900 (10 bits)

Rapport signal/bruit voisin de 100 à mi saturation soit 1% de bruit dans le signal

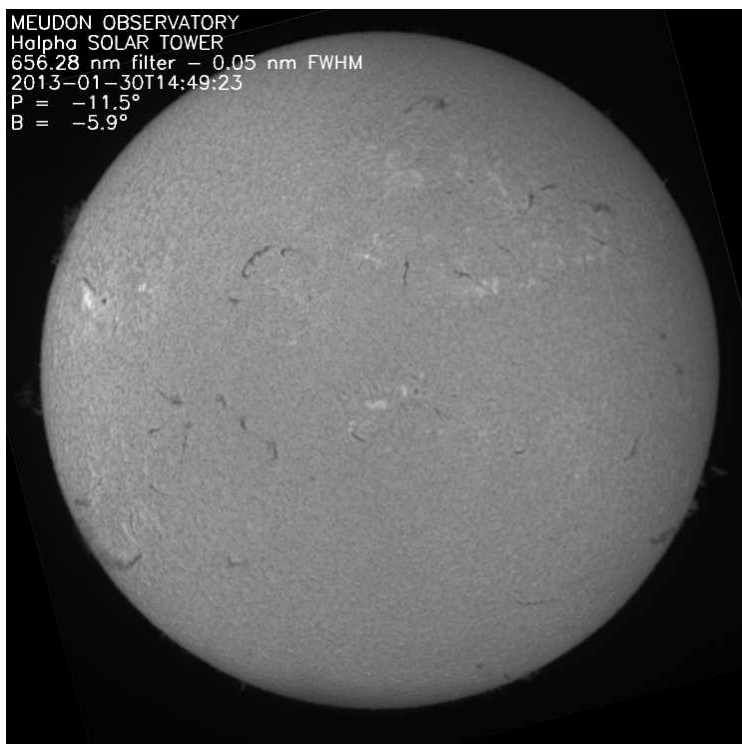
Caméra CMOS de marque Pixelink, modèle PL-B781F

25% de rendement quantique à 650 nm dans le rouge

Spécifications en pages précédentes 40 et 41.

5 - Acquisition et traitement

Les acquisitions sont faites à partir d'un ordinateur de type PC sous Windows XP par un logiciel développé en visual basic V6. On peut observer sous forme de rafales de 100 images acquises en RAW. La série d'images est ensuite traitée par le logiciel : « Registax » qui génère une image FITS, résultat du "stacking". Une procédure, développée sous IDL traite les images obtenues et les insère dans BASS2000 ainsi que dans « Global High Resolution H-alpha Network ».



*Exemple d'image
produite (ici avec
"stacking")*

X - Tour Solaire de Meudon, lunette continuum H K 395 nm de secours



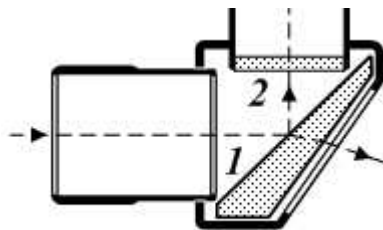
La fonction de cet instrument est de surveiller l'activité solaire au niveau photosphérique dans un large domaine spectral incluant les raies H et K du calcium ainsi que le continuum entre les raies.

1 - Instrument

Lunette de marque SkyWatcher, modèle Equinox 80 ED, $D = 80\text{mm}$, $F = 500\text{ mm}$, diaphragmée à 50 mm .

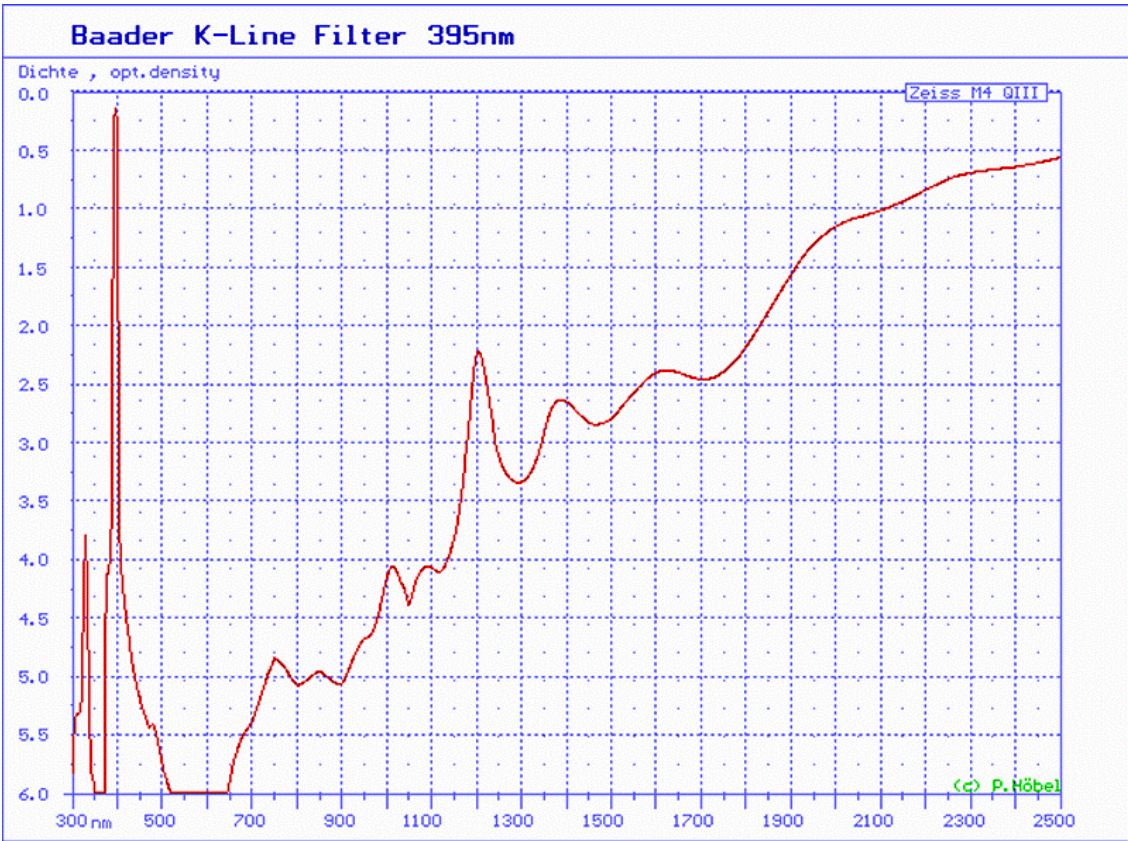
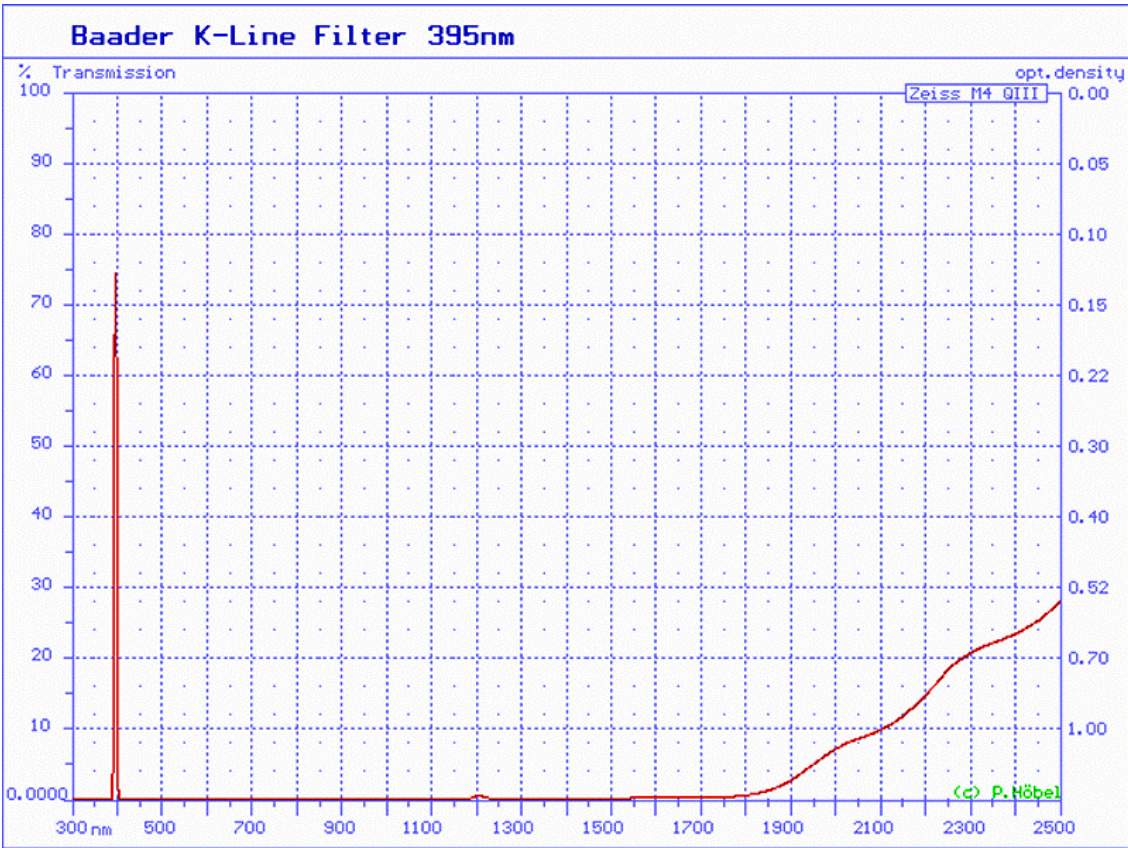
Un hélioscope de la marque Lunt assure une première atténuation de la lumière car 4 % seulement du flux est réfléchi par la lame prismatique. Une densité neutre ($D = 1.5$) est insérée dans le tube porte-oculaire. Le flux résultant n'est que de 1 pour mille.

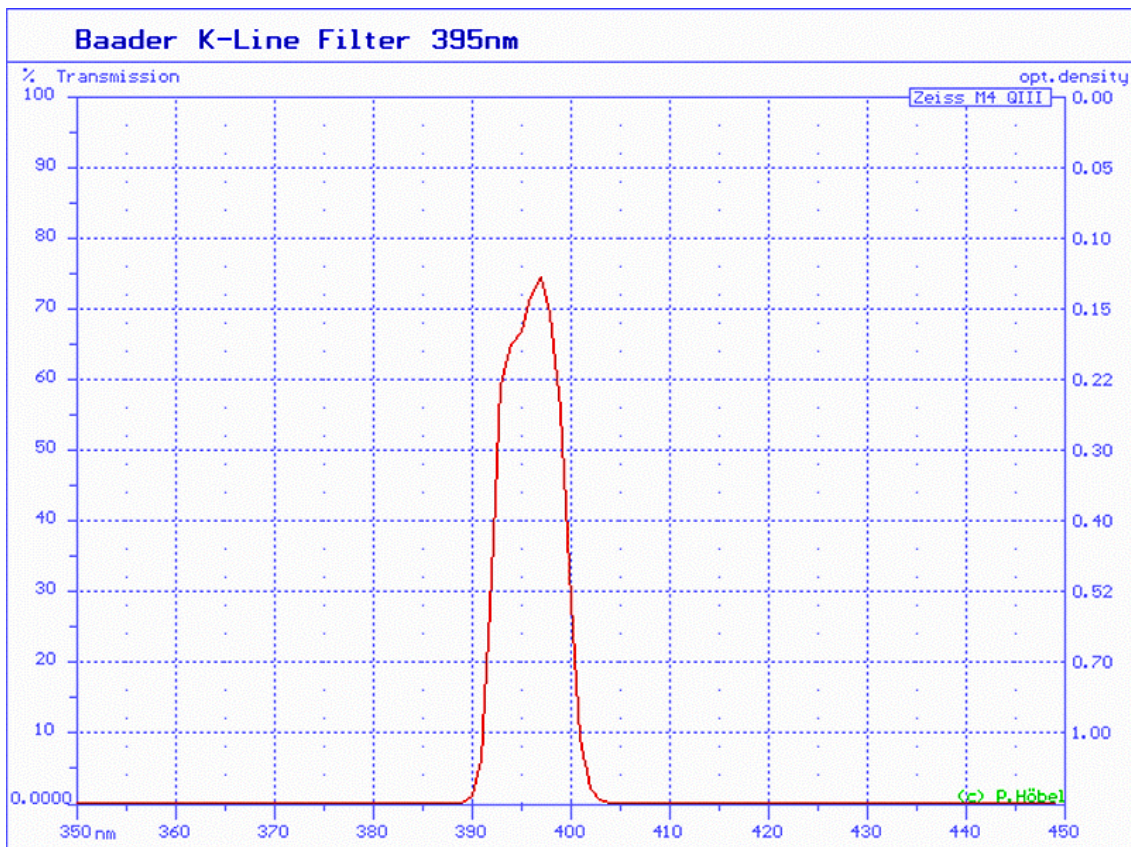
La caméra est munie d'une bague en 31.75 mm sur laquelle est vissé un filtre "Baader K-line".



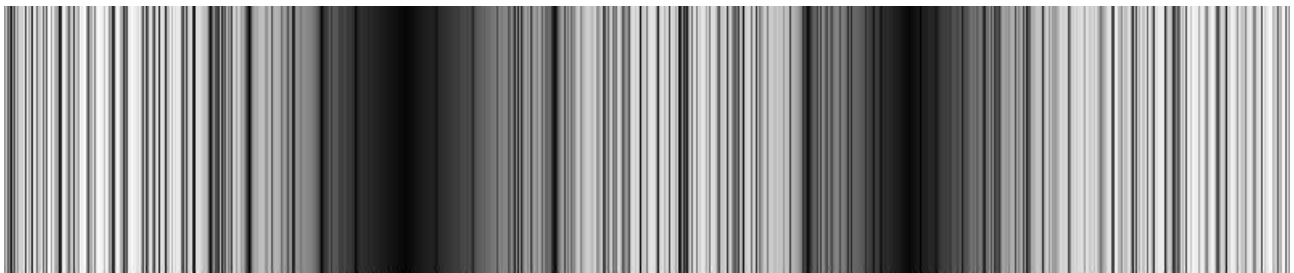
Hélioscope de Hershell:
1 = lame prismatique
2 = densité neutre

2 - Courbes de transmission du filtre Baader K-Line





Largeur du filtre à mi hauteur: 80 Angströms (les raies H et K sont dans la bande passante)



Domaine spectral approximativement visible au travers du filtre

3 - Résolution spatiale

La résolution théorique est de 2 secondes d'arc avec un diaphragme de 50 mm.

4 - Echantillonnage

Le soleil mesure en théorie et en moyenne 4.65 mm au foyer, soit 1330 pixels de 3.5 microns. En Février 2013 (le soleil a un diamètre apparent plus grand en hiver) le calcul théorique donne 4.71 mm soit 1346 pixels. La mesure à partir des observations donne 1352 pixels pour 1943 secondes d'arc, soit 1.5 seconde/pixel (bonne concordance).

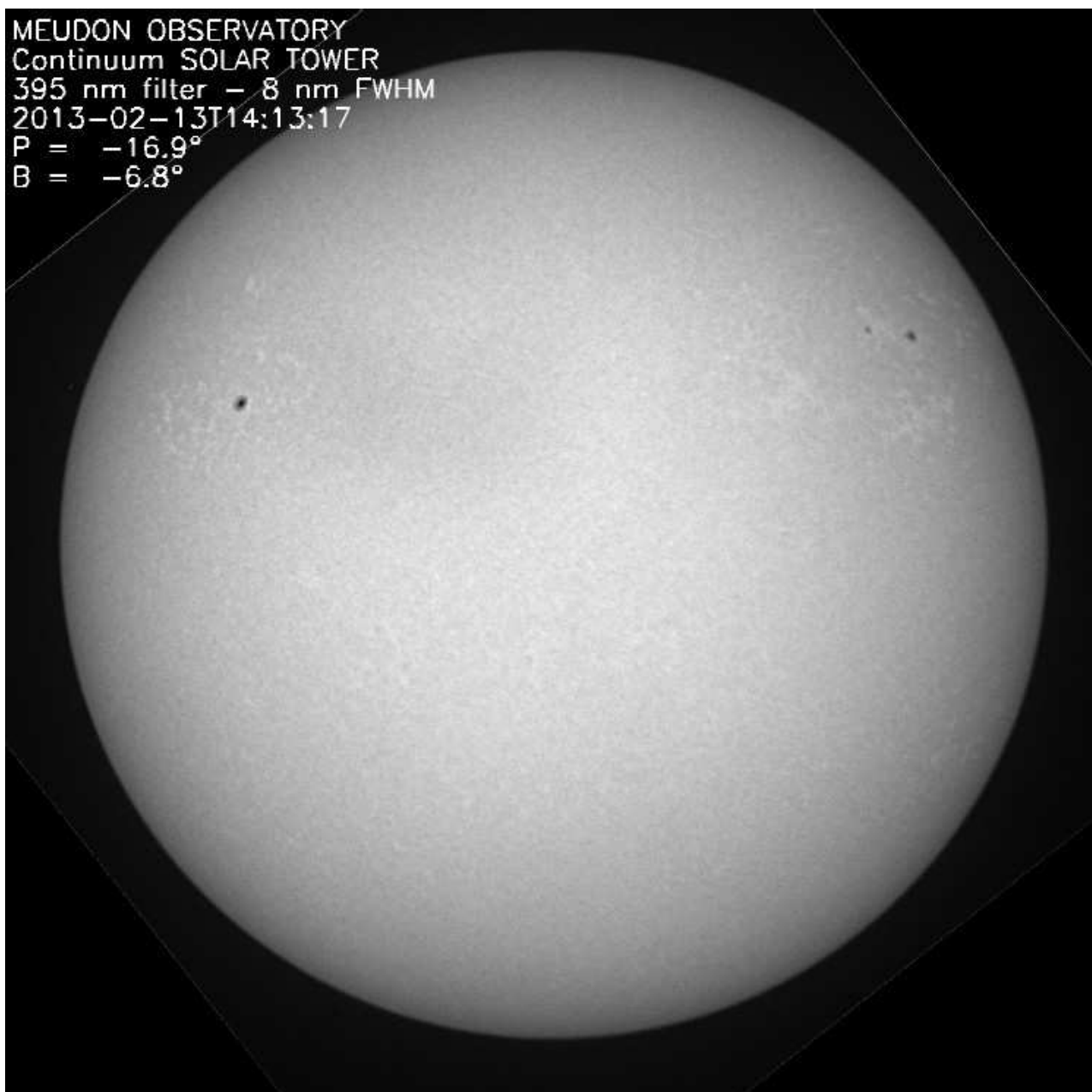
5 - Caméra et capteur

Caméra de marque Pixelink, modèle PL-B781F
 Capteur CMOS IBIS 6600 de CYPRESS
 Puits de potentiel maximum = 21500 e⁻

A mi saturation, on a 10000 e⁻ par pixel environ
Bruit de lecture 24 e⁻, bruit de photons voisin de 100 e⁻
Dynamique 21500/24 = 900 (10 bits)
Rapport signal/bruit voisin de 100 à mi saturation soit 1% de bruit dans le signal
20% de rendement quantique à 395 nm dans le violet
Spécifications détaillées en pages précédentes 40 et 41.

6 - Acquisitions et traitement

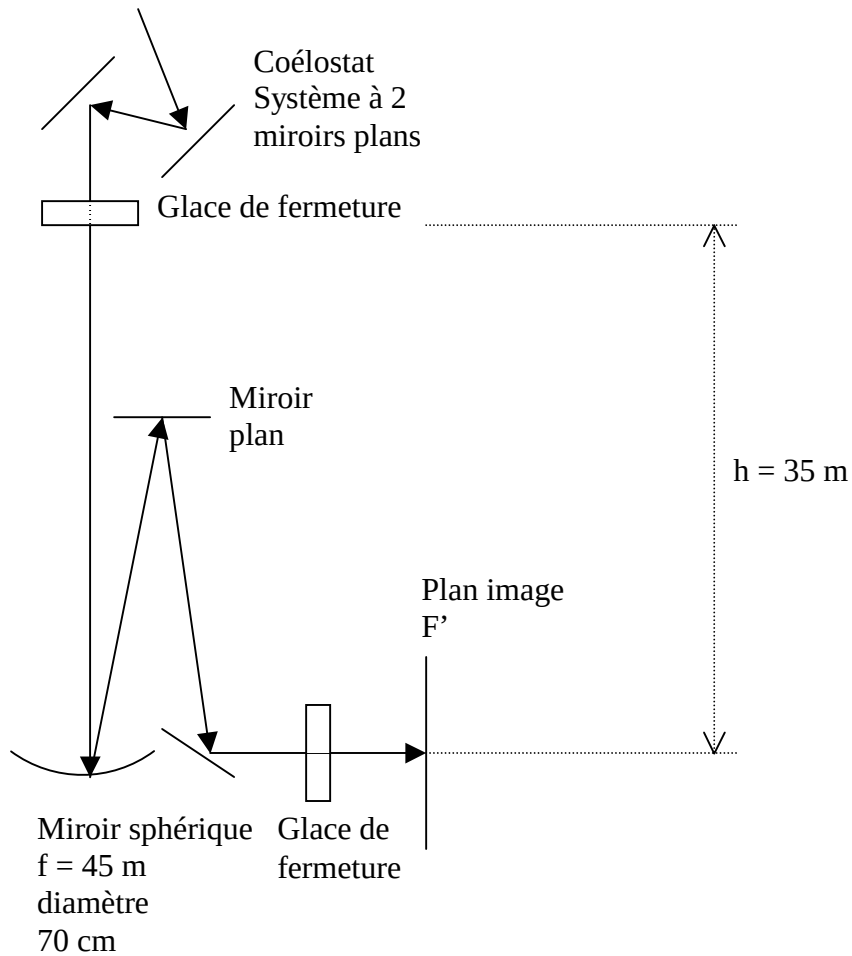
Les acquisitions sont faites à partir d'un ordinateur de type PC sous Windows XP par un logiciel développé en visual basic V6. On peut observer sous forme de rafales de 100 images acquises en RAW. La série d'images est ensuite traitée par le logiciel : « Registax » qui génère une image FITS, résultat du "stacking". Une procédure, développée sous IDL traite les images obtenues et les insère dans BASS2000 et dans le site des observateurs solaires.



Exemple d'image produite (ici avec "stacking")

XI - SPECTROGRAPHE TOUR SOLAIRE EN SIMPLE PASSAGE

1 - Tour solaire de Meudon : le télescope



La glace de fermeture haute constitue la pupille d'entrée du télescope. Son diamètre est : $D = 60 \text{ cm}$.



Les miroirs du coélostate en haut de la Tour captent la lumière du soleil



1) *diamètre de l'image solaire au foyer F'*

le diamètre angulaire α du soleil, rapport du diamètre solaire (1 400 000 km) à la distance soleil terre ($150 \cdot 10^6$ km) est en moyenne de 9.3 milli radians = $0.53^\circ = 32' = 1920''$. Le diamètre de l'image au foyer du télescope de focale f vaut $d = \alpha f = 42$ cm.

2) *que vaut 1 seconde d'arc en mm dans l'image au foyer F' ?*

On a une image de diamètre 42 cm pour un diamètre apparent de $1920''$. On en déduit que la seconde d'arc est représentée par $420 \text{ mm} / 1920'' = 0.217 \text{ mm} = 217 \mu$

3) *en supposant un flux de photons incident $\mathcal{F}$ de 1000 W/m^2 , quelle est sa valeur au foyer F' ?*

le télescope reçoit une puissance lumineuse $P = \mathcal{F} \pi D^2/4$ ou D est le diamètre de la pupille d'entrée en haut de la Tour (glace de fermeture). Avec $D = 60$ cm on obtient $P = 282 \text{ W}$. Cette puissance se répartit dans l'image de 42 cm de diamètre, soit sur une surface de 1385 cm^2 . Le flux $\mathcal{F}'$ dans l'image est donc $\mathcal{F}' = 282/1385 = 0.2 \text{ W/cm}^2 = 2000 \text{ W/m}^2$. Il n'y a donc aucun échauffement, le flux solaire au sol étant de 1000 W/m^2 .

4) *position de l'image de la pupille d'entrée par le télescope*

La pupille d'entrée du télescope est la glace de fermeture haute sous la coupole. Elle est située à 35 m environ du miroir du télescope (au pied de la Tour) dont la focale est de 45 m. Pour calculer son image, on utilise la relation de conjugaison algébrique $1/SA + 1/SA' = 2/SC$ avec $SA = -35$ m et $SC = -2f = -90$ m. On en déduit $SA' = 157$ m. L'image est donc virtuelle, et on peut considérer en première approximation qu'elle est à l'infini.

5) *pouvoir de résolution du télescope dans le vert à 500 nm*

la résolution du télescope est donnée par la relation $\theta = 1.22 \lambda / D$ pour la longueur d'onde λ , D diamètre du télescope. θ est le diamètre angulaire de la tache de diffraction d'une ouverture circulaire de diamètre D . On trouve numériquement avec $\lambda = 500 \text{ nm}$ et $D = 60$ cm (télescope limité au diamètre de la pupille d'entrée): $\theta = 0.2$ secondes d'arc. Dans le bleu la résolution sera meilleure, et dans le rouge elle sera moindre.

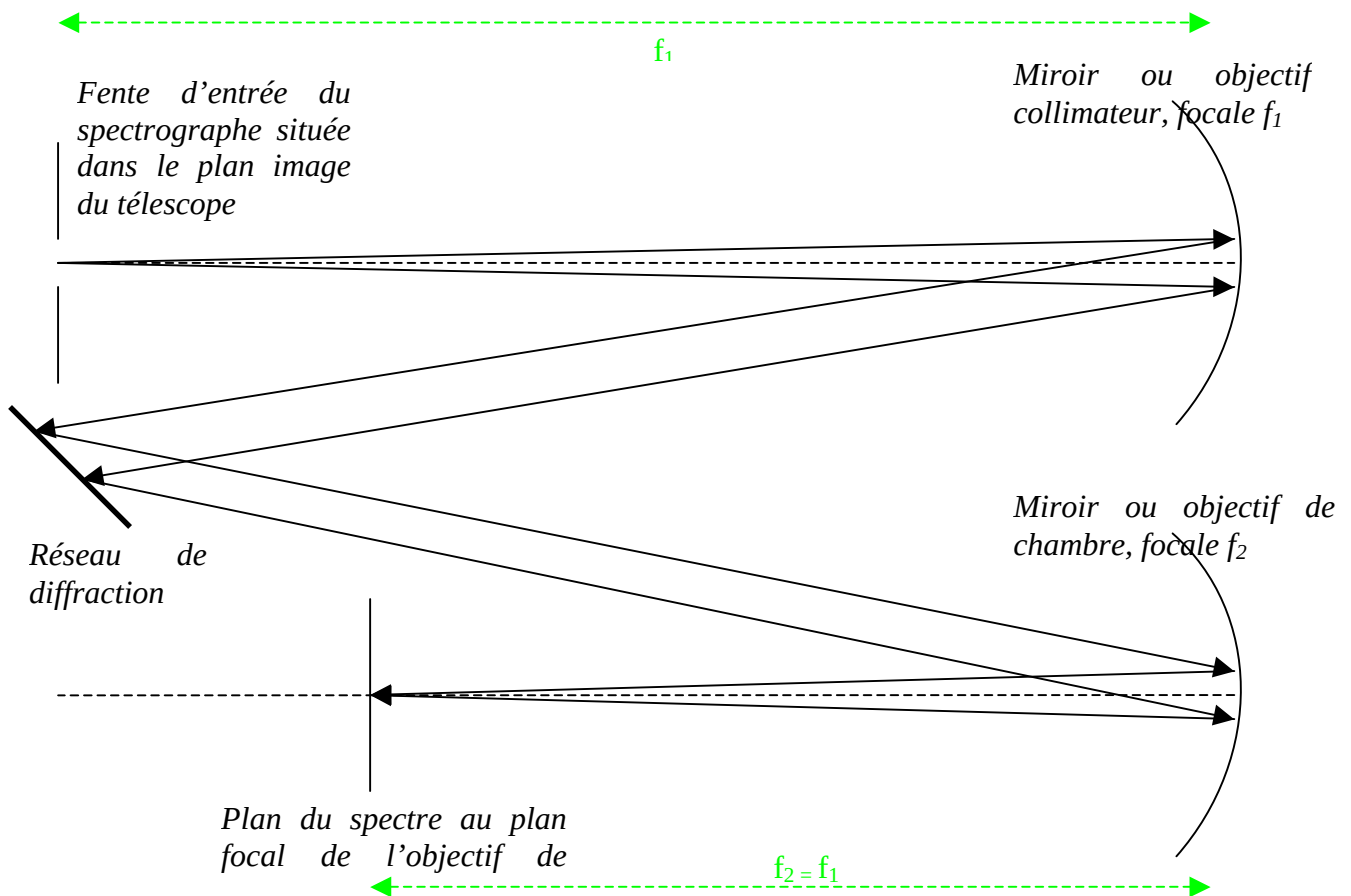
2 - le spectrographe en simple passage : caractéristiques

Il est constitué d'un miroir collimateur ($f = 14$ m) au foyer objet duquel se trouve la fente d'entrée du spectrographe et d'un objectif de chambre de même focale. Le spectrographe est alimenté par le télescope de 70 cm d'ouverture et de $f_t = 45$ m de distance focale, diaphragmé par la lame de fermeture haute de $D = 60$ cm de diamètre située à 35 m du miroir sphérique du télescope.

Réseau : $1/d = 300$ traits/mm, angle de blaze $b = 63^\circ 26'$, dimension 13×25 cm environ; la sélection des ordres est faite par des filtres interférentiels de 100 Å de bande passante.

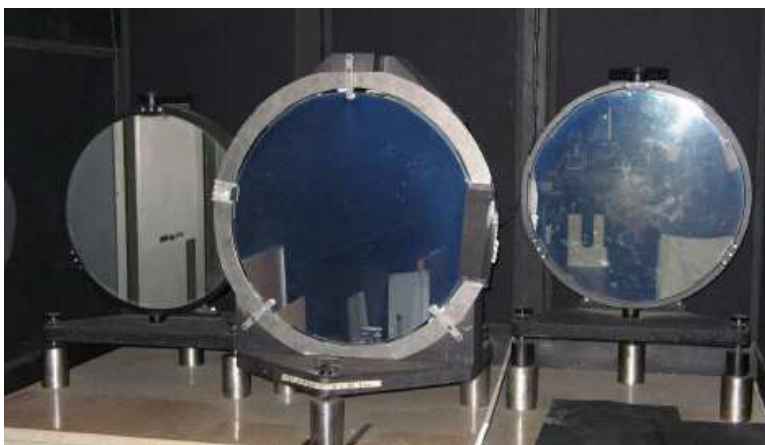
1) *image de la pupille d'entrée du télescope par le collimateur*

la pupille d'entrée du télescope est constituée de la glace de fermeture haute sous la coupole ; la position de son image par le miroir du télescope peut être considérée grossièrement à l'infini. Dans ce cas, l'image de la pupille par le miroir collimateur du spectrographe se trouve au foyer image du collimateur, c'est à dire sur le réseau de diffraction.



2) quelle est sa dimension sur le réseau ?

La dimension de l'image de la pupille par le collimateur vaut $D' = \alpha f$, f distance focale du collimateur (14 m) et α angle sous lequel on voit la pupille rejetée à l'infini ($\alpha = D/f_t$ avec D diamètre de la pupille et f_t focale du télescope = $0.6/45 = 1/75$, l'inverse de ce nombre est aussi appelé ouverture du télescope). Donc $D' = D f/f_t = 14/75 = 18$ cm



Chambre et collimateur du spectrographe; réseau et filtres sélectionneurs d'ordre

3) dans quel intervalle trouve-t-on les valeurs de k (ordre d'interférence) quand on s'intéresse à des raies spectrales dans le domaine 450 – 650 nm ?

domaine spectral 450 / 650 nm ; dans le blaze, on a $i = i' = b$ donc $2 \sin b = k \lambda / d$
ce qui donne $k \lambda = 59627$ avec λ mesuré en Å, $d = 1/300$ mm, $b = 63^\circ 26'$

$k = 13$ donne $\lambda = 4586 \text{ \AA}$ bleu
 $k = 12$ donne $\lambda = 4969 \text{ \AA}$ vert
 $k = 11$ donne $\lambda = 5420 \text{ \AA}$ vert
 $k = 10$ donne $\lambda = 5962 \text{ \AA}$ jaune
 $k = 9$ donne $\lambda = 6625 \text{ \AA}$ rouge

4) dispersion du spectrographe dans le bleu ($\approx 450 \text{ nm}$) et dans le rouge ($\approx 650 \text{ nm}$).

dispersion $dx / d\lambda = k f / (d \cos b)$ avec $f = 14 \text{ m}$, $d = 1/300 \text{ mm}$, $b = 63^\circ 26'$

$k = 13$ donne $dx / d\lambda = 12.2 \text{ mm/\AA}$ dans le bleu ($\lambda = 4586 \text{ \AA}$)

$k = 9$ donne $dx / d\lambda = 8.5 \text{ mm/\AA}$ dans le rouge ($\lambda = 6625 \text{ \AA}$)

5) résolution spectrale $\Delta\lambda$ en $\text{m\AA}$ pour une fente d'entrée du spectrographe de 1 arc sec de largeur, puis le rapport $\lambda/\Delta\lambda$ dans le bleu ($\approx 450 \text{ nm}$) et dans le rouge ($\approx 650 \text{ nm}$).

$\Delta\lambda = \Delta x d \cos b / (k f)$ avec Δx largeur de la fente d'entrée du spectrographe.

Une seconde d'arc correspond à $\Delta x = 0.217 \text{ mm}$ dans l'image. Avec cette valeur :

$k = 13$ donne $\Delta\lambda = 18 \text{ m\AA}$ dans le bleu ($\lambda = 4586 \text{ \AA}$)

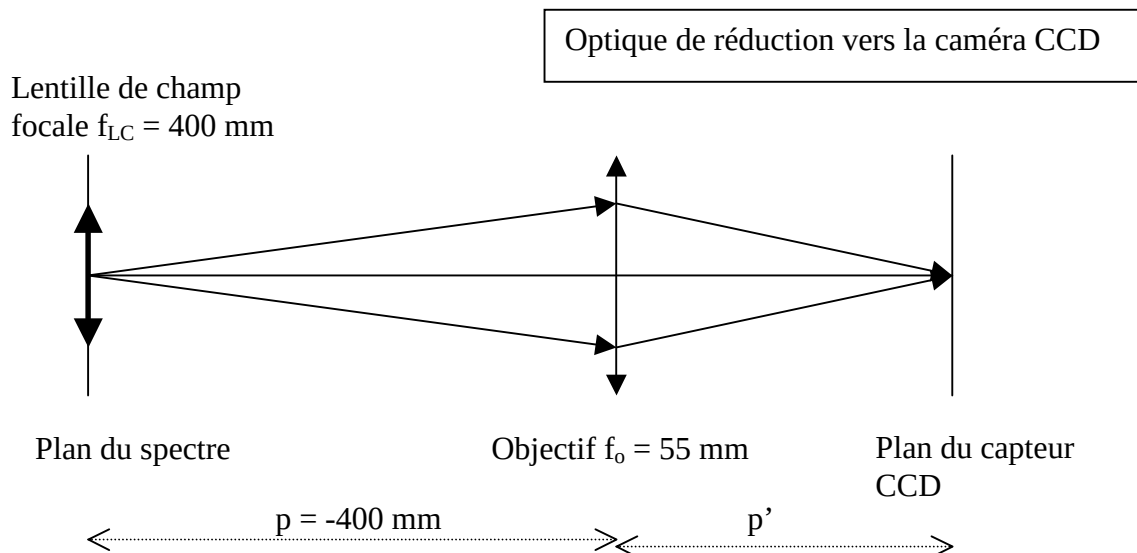
$k = 9$ donne $\Delta\lambda = 26 \text{ m\AA}$ dans le rouge ($\lambda = 6625 \text{ \AA}$)

Dans le blaze, $\lambda = 2 d \sin b / k$ d'où l'on tire $\lambda / \Delta\lambda = 2 f \tan b / \Delta x$

Ce rapport $\lambda / \Delta\lambda = 250\,000$ est indépendant de k et est la résolution du spectrographe. Si l'on prend une fente moitié ($0.5''$ sur le ciel), la résolution passe à $500\,000$.

3 - le spectrographe en simple passage : sortie caméra CCD

La caméra CCD porte un objectif de 55 mm de distance focale et une lentille de champ de 400 mm de distance focale est placée dans le spectre.



6) rôle de la lentille de champ

la lentille de champ forme une image de la pupille (qui est rejetée à l'infini par l'objectif de chambre du spectrographe) sur l'objectif de la caméra. Son diamètre vaut $D'' = \alpha f_{LC}$, f_{LC} distance focale de la lentille et α angle sous lequel on voit la pupille ($1/75 \text{ rd}$). Donc $D'' = 40\text{cm}/75 = 0.5 \text{ cm}$

7) rapport de réduction du spectre ainsi obtenu

Le rapport de réduction est donné par la relation de conjugaison $-1/p + 1/p' = 1/f_0$ avec $p = -400$ mm et $f_0 = 55$ mm (distance focale de l'objectif de la caméra). On en déduit $p' = 63.7$ mm et le grandissement vaut $\gamma = p'/p = -0.16$.

8) les pixels du CCD font 12.9 microns en binning 2x2, quel est l'échantillonnage spectral théorique obtenu dans le bleu (≈ 450 nm) et dans le rouge (≈ 650 nm) ?

bleu : la dispersion 12.2 mm/Å devient 1.95 mm/Å sur le détecteur ($k = 13$, réduction 0.16)

dans le rouge : la dispersion 8.5 mm/Å devient 1.35 mm/Å sur le détecteur ($k = 9$, réduction 0.16)

le détecteur possède un pixel binné 2x2 de 12.9 μ . On en déduit la valeur du pixel spectral :

1 pixel = 12.9 $\mu = 6.6$ mÅ dans le bleu ($k = 13$)

1 pixel = 12.9 $\mu = 9.6$ mÅ dans le rouge ($k = 9$)

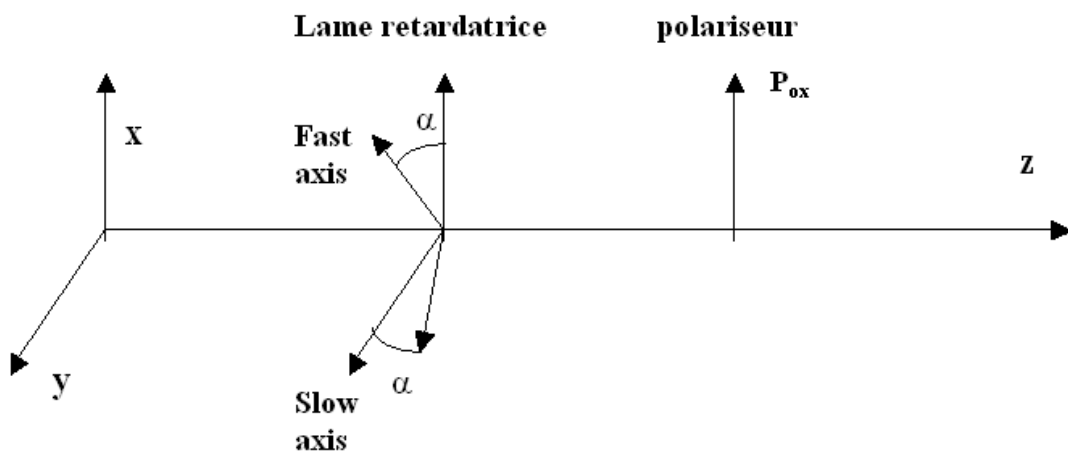
Le pixel spatial se calcule sachant qu'une seconde d'arc représente 217 $\mu \times 0.16 = 34.5$ μ après la réduction de facteur 0.16. Du coup, 1 pixel = 12.9 $\mu = 12.9/34.5'' = 0.37''$ environ

9) échantillonnage et résolution spectrale obtenue avec une fente de 1 arc sec dans le bleu

la résolution spectrale est limitée par le pixel spectral sur le détecteur et la largeur de la fente. Dans le bleu (ordre $k = 13$), le pixel spectral sur le détecteur vaut 6.6 mÅ, ce qui signifie (théorème de l'échantillonnage) que la résolution du détecteur est de 2×6.6 mÅ = 13.2 mÅ. La fente de $1''$ donne une résolution du spectrographe de 18 mÅ : c'est donc elle qui limite les performances, pas le détecteur.

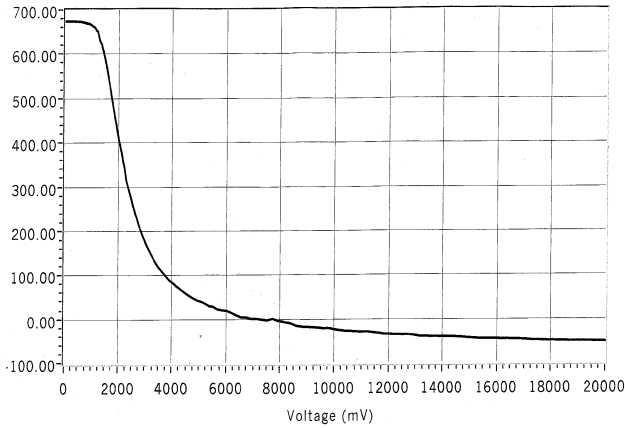
4 - le polarimètre à cristal liquide

C'est un dispositif optique constitué d'un polariseur et d'une lame retardatrice à retard variable δ telle que $\alpha = \pi/4$ (azimuth fixe) et δ variant entre 0 et 2π par action d'une tension dont l'amplitude peut varier.

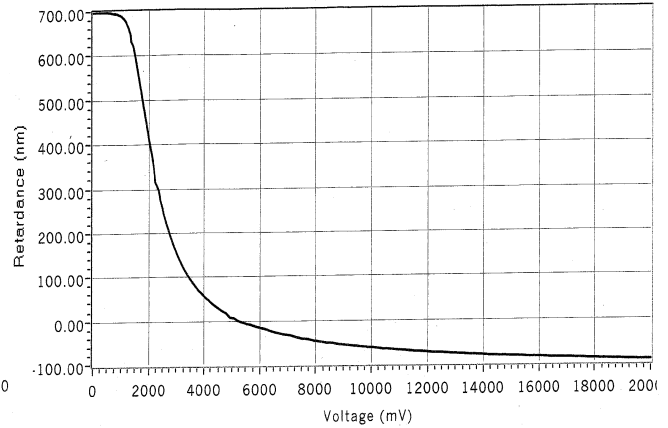


polarimètre: Cristaux liquides et Contrôleur D3040 de Meadowlark Optics via liaison RS232

DATE: 05/09/2008
PART #: D8280
FILTER WAVELENGTH: 631.9
PART WAVELENGTH: 633.0



DATE: 11/03/2008
PART #: J8253
FILTER WAVELENGTH: 631.5
PART WAVELENGTH: 633.0



1) liaison entre le vecteur de Stokes d'entrée et de sortie via les matrices de Müller

$$S_{out} = P_{ox} R_{-\pi/4} T_{\delta} R_{\pi/4} S_{in}$$

Produit matriciel $P_{ox} R_{-\pi/4} T_{\delta} R_{\pi/4}$

1	$\cos(\delta)$	0	$-\sin(\delta)$
1	$\cos(\delta)$	0	$-\sin(\delta)$
0	0	0	0
0	0	0	0

x 1/2

2) première composante I_{out} du vecteur de Stokes de sortie

produit avec le vecteur colonne S_{in} (I_{in} , Q_{in} , U_{in} , V_{in}):

$$I_{out} = \frac{1}{2} [I_{in} + Q_{in} \cos(\delta) - V_{in} \sin(\delta)]$$

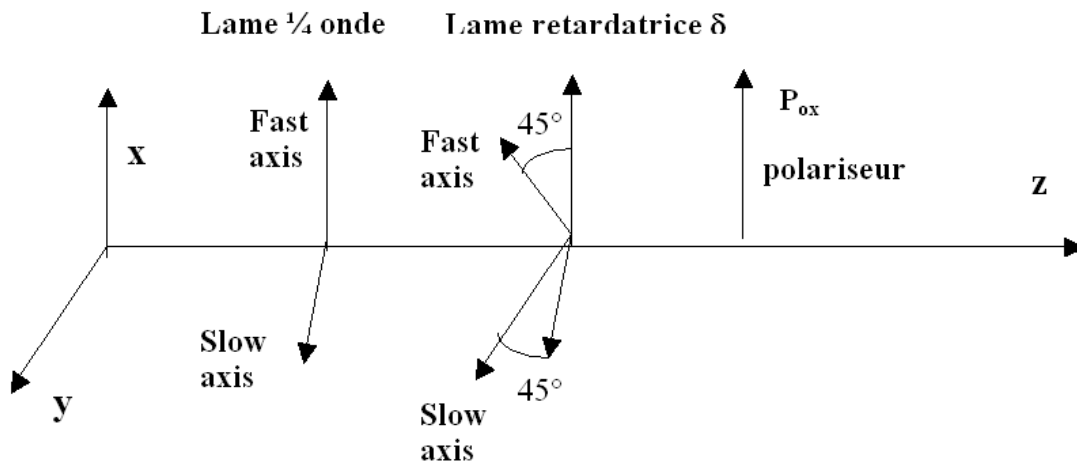
3) couples de valeurs du retard δ permettant de déduire par combinaison linéaire I_{in} , Q_{in} et V_{in} des mesures

$$\begin{aligned} \text{Pour } \delta = 0, & \quad I_1 = \frac{1}{2} [I_{in} + Q_{in}] \\ \text{Pour } \delta = \pi, & \quad I_2 = \frac{1}{2} [I_{in} - Q_{in}] \\ \text{Pour } \delta = \pi/2, & \quad I_3 = \frac{1}{2} [I_{in} - V_{in}] \\ \text{Pour } \delta = 3\pi/2, & \quad I_4 = \frac{1}{2} [I_{in} + V_{in}] \end{aligned}$$

Il est aisé de déduire de ces signaux I_{in} , Q_{in} et V_{in} :

$$\begin{aligned} I_{in} &= I_1 + I_2 \text{ ou } I_{in} = I_3 + I_4 \\ Q_{in} &= I_1 - I_2 \\ V_{in} &= I_4 - I_3 \end{aligned}$$

On pourrait mesurer U_{in} à condition de pouvoir faire tourner le cristal liquide vers les positions $\alpha = \pi/8$ et $3\pi/8$, ce qui n'est pas prévu ; c'est pourquoi pour mesurer U_{in} on place devant la lame à retard variable δ d'azimut $\pi/4$ une autre lame quart d'onde (retard $\pi/2$) d'azimut nul (d'axes parallèles à ox et oy), selon la figure ci dessous :



5) liaison entre le vecteur de Stokes d'entrée et de sortie via les matrices de Müller:

$$S_{out} = P_{ox} R_{-\pi/4} T_{\delta} R_{\pi/4} T_{\pi/2} S_{in}$$

produit matriciel $P_{ox} R_{-\pi/4} T_{\delta} R_{\pi/4} T_{\pi/2}$

1	$\cos(\delta)$	$\sin(\delta)$	0
1	$\cos(\delta)$	$\sin(\delta)$	0
0	0	0	0
0	0	0	0

x 1/2

6) première composante I_{out} du vecteur de Stokes de sortie:

produit avec le vecteur colonne S_{in} (I_{in} , Q_{in} , U_{in} , V_{in}):

$$I_{out} = \frac{1}{2} [I_{in} + Q_{in} \cos(\delta) + U_{in} \sin(\delta)]$$

7) couples de valeurs du retard δ permettant de déduire par combinaison linéaire I_{in} , Q_{in} et U_{in} des mesures.

$$\begin{aligned} \text{Pour } \delta = 0, & \quad I_1 = \frac{1}{2} [I_{in} + Q_{in}] \\ \text{Pour } \delta = \pi, & \quad I_2 = \frac{1}{2} [I_{in} - Q_{in}] \\ \text{Pour } \delta = \pi/2, & \quad I_3 = \frac{1}{2} [I_{in} + U_{in}] \\ \text{Pour } \delta = 3\pi/2, & \quad I_4 = \frac{1}{2} [I_{in} - U_{in}] \end{aligned}$$

D'où l'on peut en déduire I_{in} , Q_{in} et U_{in} :

$$I_{in} = I_1 + I_2 \text{ ou } I_{in} = I_3 + I_4$$

$$Q_{in} = I_1 - I_2$$

$$U_{in} = I_3 - I_4$$

5 - Capteur et caméra CCD

SENSICAM QE de LAVISION (Allemagne) sur carte PCI spécifique via fibre optique:

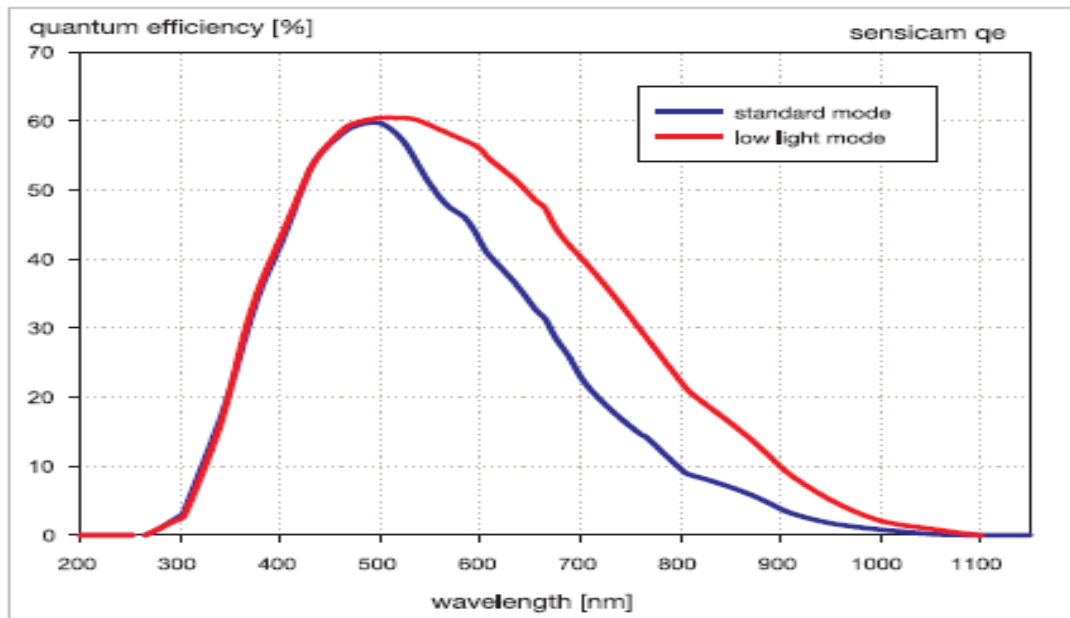
quantum efficiency up to 60 %, capteur SONY ICX285 interligne bas bruit

extremely low noise, down to 4 e⁻ rms, puits de potentiel de 18000 e

rapport S/B à mi saturation voisin de 100

12 bit dynamic range (18000 e / 4 e = 4500)

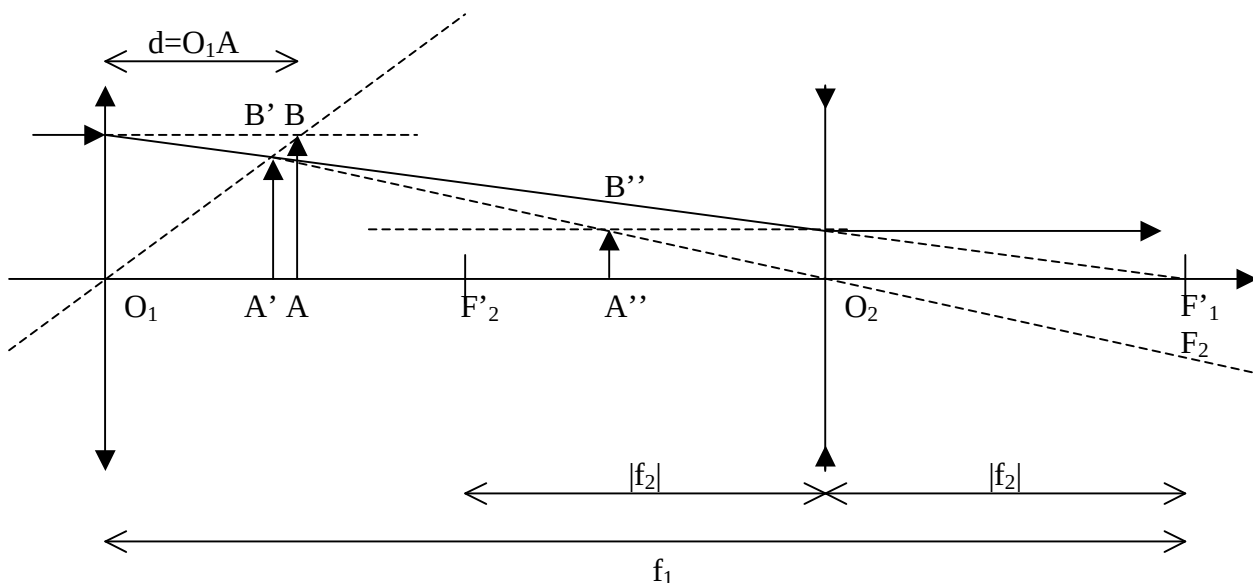
thermoelectrical cooling (Peltier) down to $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$
 high resolution 1376×1040 pixel
 electronic shutter / exposure times from 500 ns - 3600 s
 binning (horizontal & vertical), 1, 2, 4, 8
 region of interest (ROI)
 10 frames per second at full CCD resolution (16 MHz)



Rendement quantique du détecteur CCD

6 - Réducteur focal

On souhaite réduire la distance focale un télescope sans pour autant déplacer la position de son image focale. Pour ce faire, on utilise l'association afocale d'une lentille convergente et d'une lentille divergente situées de part et d'autre du plan focal du télescope selon le schéma suivant :



Le plan image du télescope est représenté par l'objet AB . L'image de AB par la lentille convergente de focale $f_1 > 0$ est $A'B'$. Celle de $A'B'$ par la lentille divergente de focale $f_2 < 0$ est $A''B''$. Le foyer image F'_1 de la lentille convergente est confondu avec le foyer objet F_2 de la divergente.

Il est indispensable que $A''B''$ soit confondu avec AB pour ne pas perturber le fonctionnement des instruments focaux (spectrographe). On se fixe le grandissement du réducteur focal : $\gamma = -f_2 / f_1 = |f_2| / f_1 = 1/2$ avec $f_1 = 6.48$ m et $f_2 = -3.24$ m. La fente est en A et la préfente en A' .

1) connaissant γ , comment choisir la distance $O_1A = d$ pour que $A''B''$ soit confondu avec AB ?

On appelle $d = O_1A$ la position de l'objet AB et on calcule d'abord la position O_1A' de l'image $A'B'$ par la lentille convergente. On en déduit sa position O_2A' de $A'B'$ par rapport à la lentille divergente puisque l'on connaît la distance entre les deux lentilles qui vaut $f_1 + f_2$ (avec $f_2 < 0$). Connaissant O_2A' , on en déduit la position O_2A'' de l'image $A''B''$ par la lentille divergente.

On se fixe comme condition que les positions de AB et $A''B''$ sont confondues, c'est à dire que l'on impose $d = O_1A = O_1A''$.

On trouve alors $d = f_1 (1-\gamma)/(1+\gamma)$ où $\gamma = -f_2/f_1 = A''B''/AB > 0$ est connu, soit $d = 2.16$ m.

2) que vaut le grandissement de la première lentille et O_1A' ?

grandissement de la lentille convergente dans ces conditions :

$$\gamma_1 = A'B'/AB = O_1A'/O_1A = (1+\gamma)/2 = 3/4 \text{ pour les valeurs données de } f_1 \text{ et } f_2$$

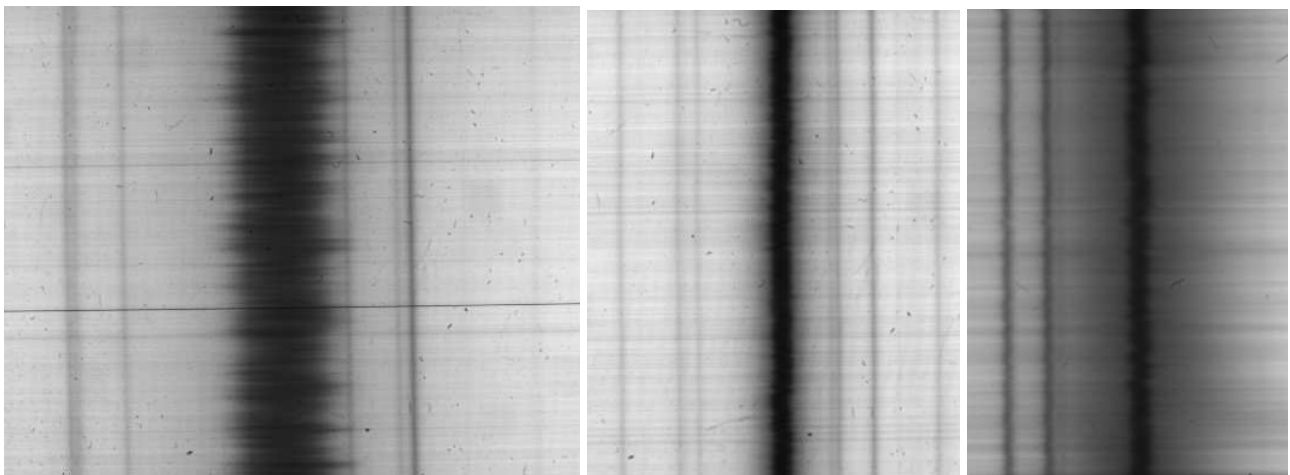
$$\text{Alors, } O_1A' = f_1 (1 - \gamma) / 2 = (1+\gamma)/2 O_1A = 1.62 \text{ m}$$

$$\text{La distance fente/préfente } A'A \text{ vaut donc } 2.16 - 1.62 = 0.54 \text{ m}$$

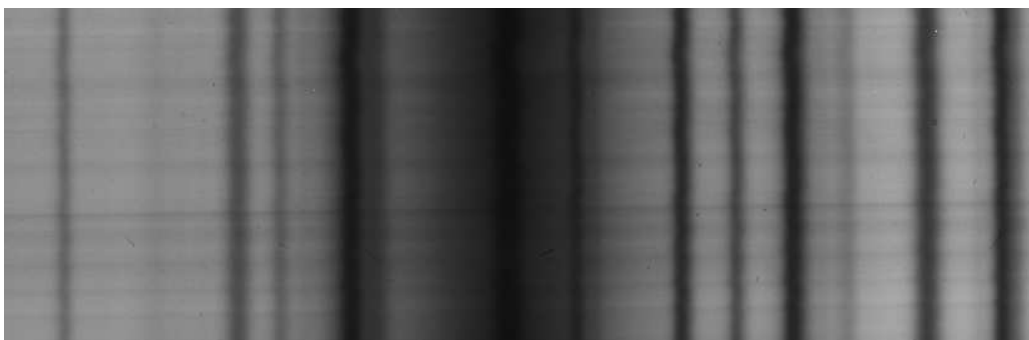
3) quel est le grandissement de la seconde lentille ?

grandissement de la lentille divergente dans ces conditions :

$$\gamma_2 = A''B''/A'B' = O_2A''/O_2A' = 2\gamma/(1+\gamma) = 2/3 \text{ pour les valeurs données de } f_1 \text{ et } f_2.$$



Exemples: raies H alpha 656.3 nm, NaD1 589.6 nm, MgI 518.4 nm, CaI 422.7 nm



XII - DPSM TOUR SOLAIRE DE MEUDON (DOUBLE PASSAGE SOUSTRACTIF MULTICANAL)

1 - Spectrographe en version DPSM

Le spectrographe est muni d'une fenêtre rectangulaire, et non d'une fente fine. Il fonctionne en double passage soustractif sur le réseau de diffraction. Dans le plan du spectre, on place une grille multifente accolée à un écarteur de faisceaux appelé "boîte à prismes" (N fentes + N prismes déviateurs) permettant, à l'issue du second passage sur le réseau, de former N images (canaux) au foyer du spectrographe; la longueur d'onde varie linéairement d'un bord à l'autre de chaque canal; d'un canal à l'autre, il existe une translation fixe en longueur d'onde.

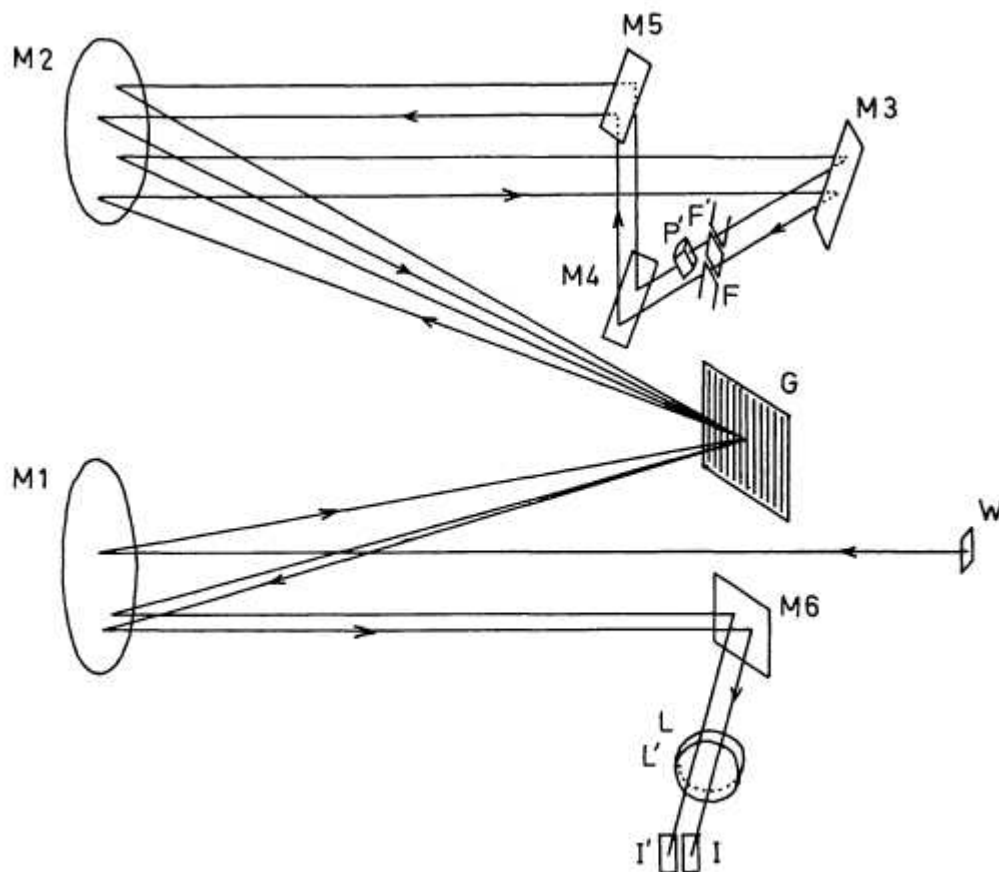


Fig. 1. Diagram of the subtractive double pass spectrograph.

La fonction de transmission est donnée par la figure suivante avec:

- n numéro du canal
- N nombre total de canaux
- w largeur spectrale d'une fente rectangulaire en A
- ϵ distance spectrale entre deux canaux successifs en A
- $1/\alpha$ dispersion du spectrographe en mm/A
- x abscisse dans la direction de dispersion le long d'un canal
- X largeur de la fenêtre d'entrée du spectrographe

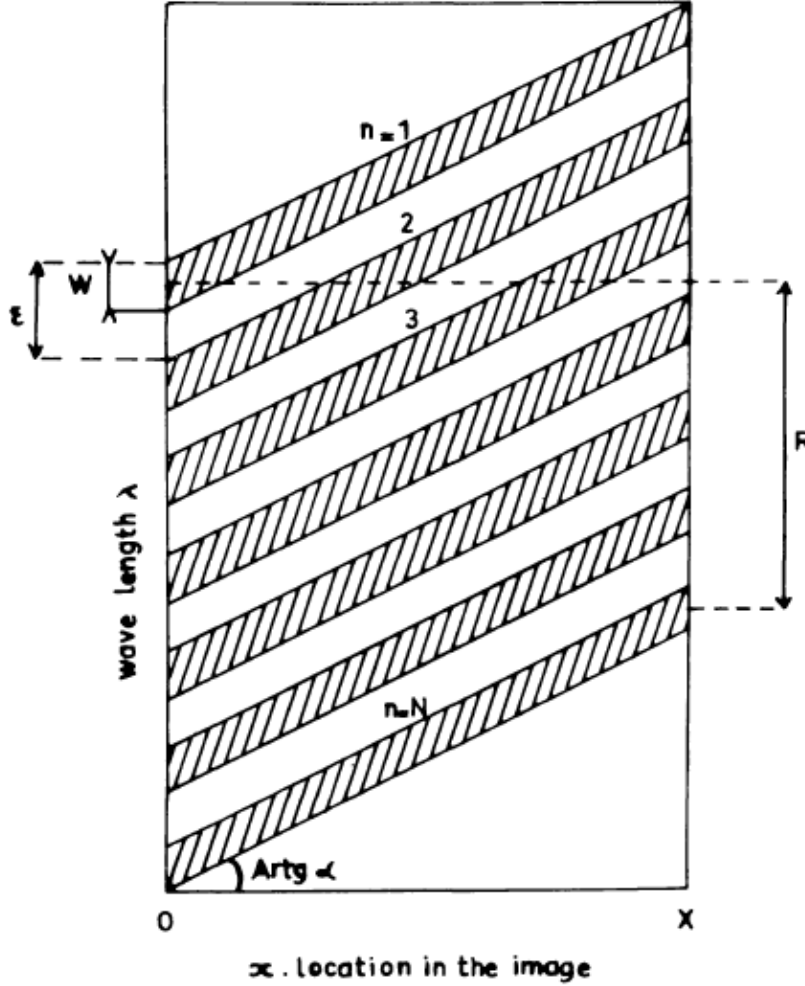
La longueur d'onde varie d'un bord à l'autre du canal selon la loi:

$$\lambda = \lambda_0 - n\varepsilon + \alpha x \pm w/2. \quad (1)$$

In the whole field ($0 < x < X, 0 < y < Y$), the spectrum is obtained with the wavelength resolution ε in the minimum range R defined by

$$\lambda_0 - N\varepsilon + \alpha X < \lambda < \lambda_0 - \varepsilon. \quad (2)$$

In the Meudon spectrograph $X = 8 \text{ mm}$, $1/\alpha = 8.3 \text{ mm}/\text{\AA}$, $\varepsilon = 0.36 \text{ \AA}$, $w = 0.18 \text{ \AA}$ and $R = 1.2 \text{ \AA}$ for the $H\alpha$ line.



Wavelength versus the x -coordinate on the Sun for the N channels of the MSDP. Hatched areas show the photons which are recorded simultaneously.

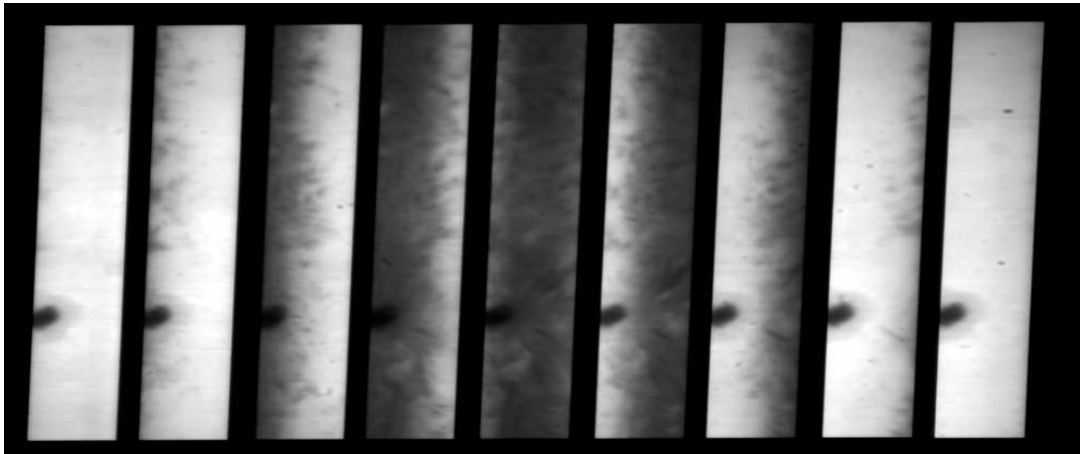
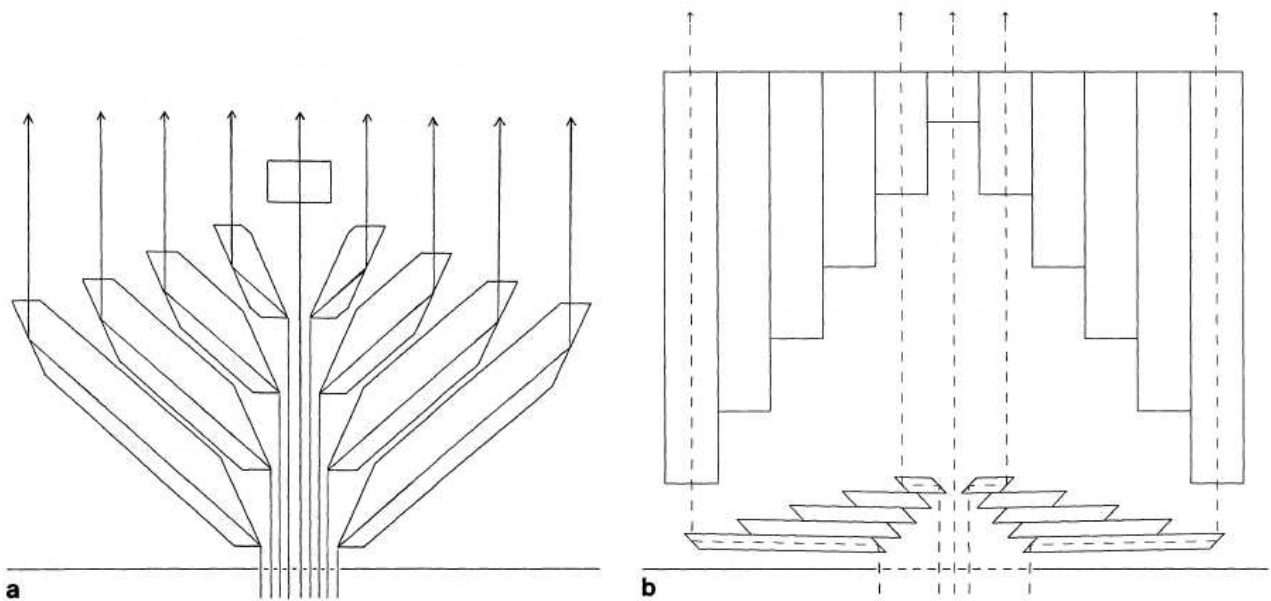
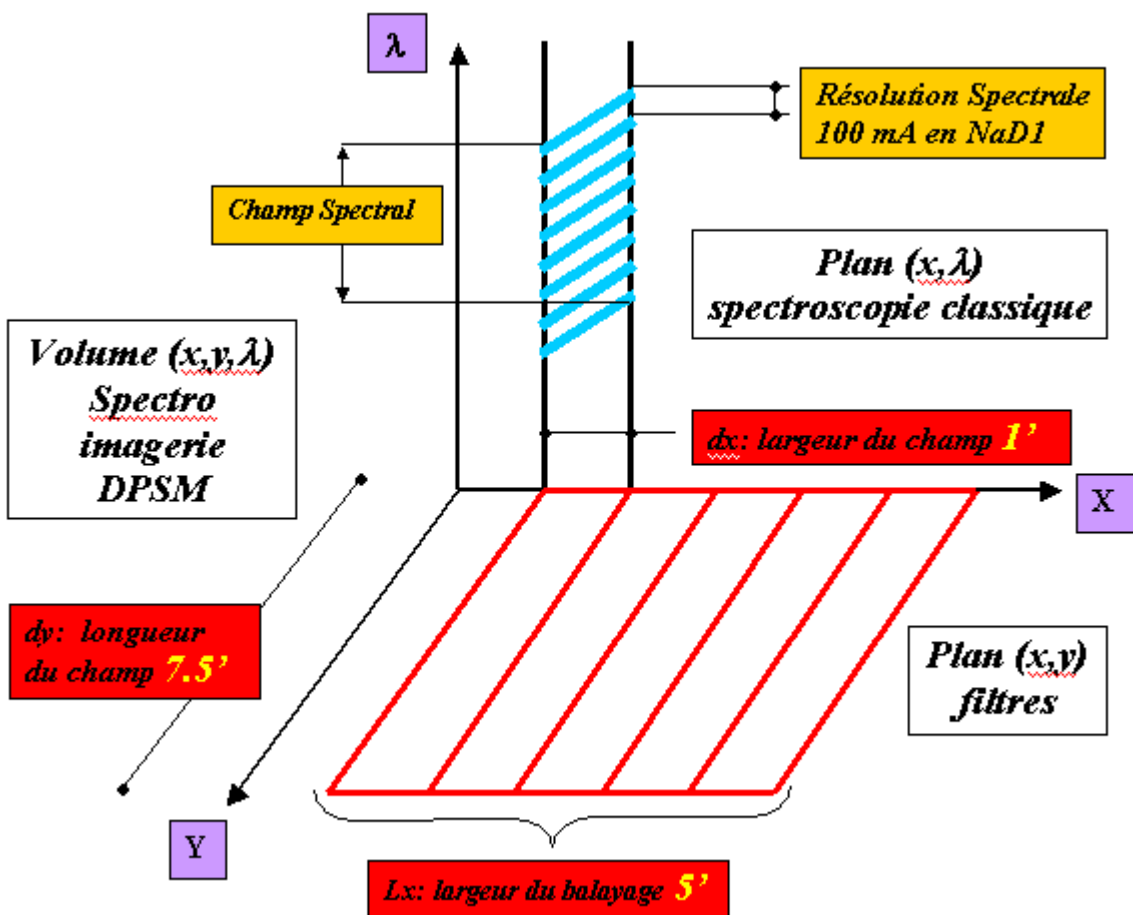


Image DPSM à 9 canaux simultanés: raie H alpha



Différentes générations de boîtes multifentes à prismes déviateurs



Positionnement du DPSM par rapport aux autres techniques (spectro classique, filtres)

Le champ élémentaire du DPSM à Meudon est de $1' \times 8'$ avec réducteur focal (pixel de $0.5''$) ou de $30'' \times 4'$ (pixel de $0.25''$) sans réducteur focal. On peut étendre le champ observé par balayage à l'aide d'une batterie de prismes déviateurs dans le faisceau du télescope jusqu'à $5' \times 8'$

**BOÎTES 9
CANAUX**

Pas de la grille	Largeur fentes	Ouverture du faisceau	Translation entre les canaux	Utilisation actuelle
2500 μ	1500 μ	F / 60	9 mm	Tour Meudon
2500 μ	1500 μ	F / 60	9 mm	VTT
1200 μ	400 μ	F / 60	9 mm	Pologne
1200 μ	400 μ	F / 60	9 mm	Themis et VTT
1000 μ	400 μ	F/100	9 mm	Tour Meudon

**BOÎTES 11
CANAUX**

1200 μ	800 μ	F / 60	7.5 mm	Pic du midi
600 μ	300 μ	F / 60	7.5 mm	Pic du midi
600 μ	300 μ	F / 60	7.5 mm	VTT

**BOÎTE 14
CANAUX**

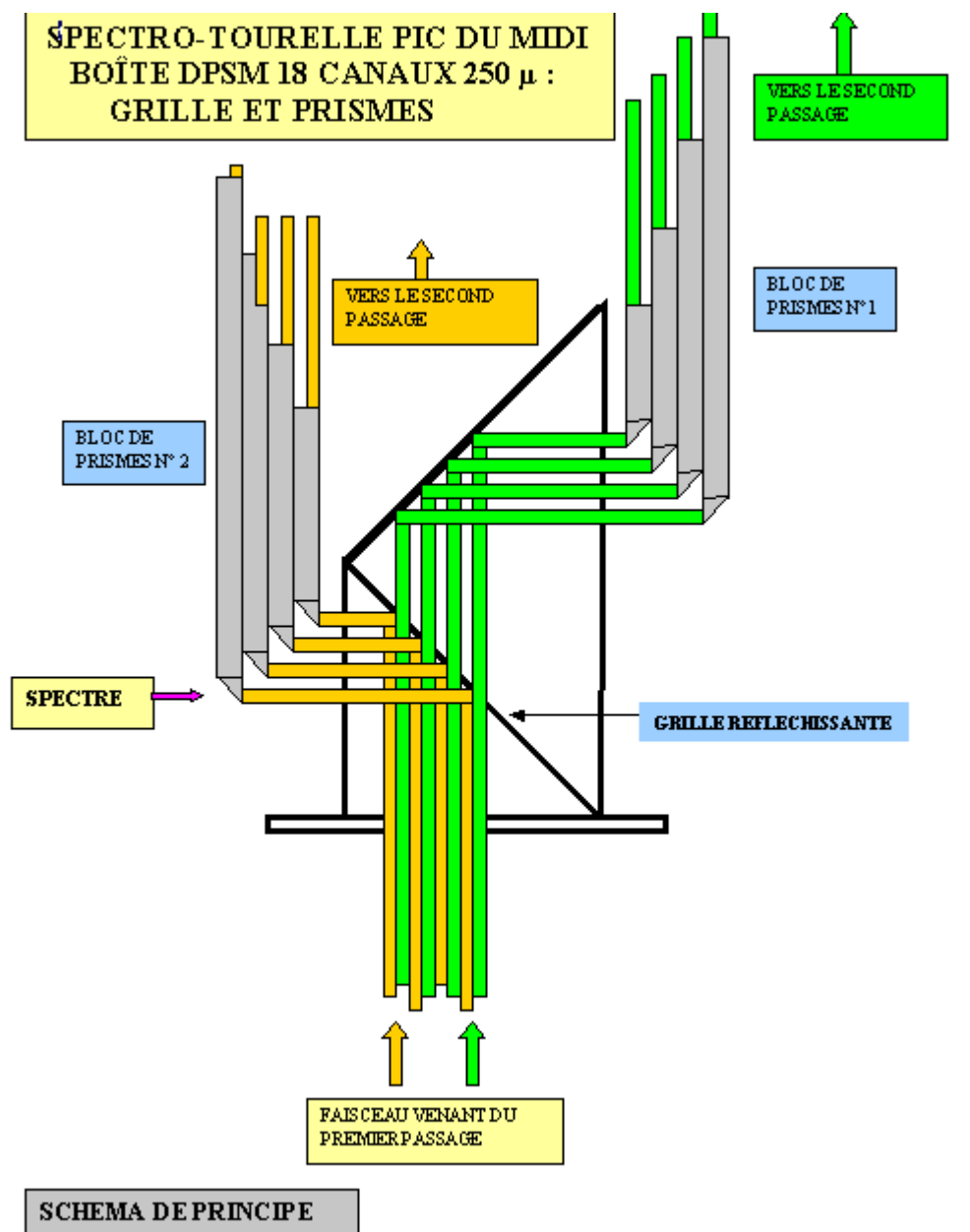
250 μ	100 μ	F / 60	3 mm	Themis terminée mais jamais mise en service
-----------	-----------	--------	------	---

**BOÎTES 16
CANAUX**

400 μ	200 μ	F / 60	3.3 mm	Themis
400 μ	200 μ	F / 60	3.3 mm	Themis

**BOÎTES 18
CANAUX**

600 μ	600 μ	F / 60	3.6 mm	Themis : jamais financée
250 μ	250 μ	F / 120	3.6 mm	Pic du midi : à régler



Exemple de boîte à prismes déviateurs DPSM à grand nombre de canaux

2 - Détecteur CCD

L'image au foyer, de 10 x 7 cm, est réduite d'un facteur 10 par un système composé d'une lentille de champ de focale 1 m; la caméra porte un objectif NIKON macro de 105 mm de distance focale, dans laquelle se forme la pupille de l'instrument (environ 1 cm de diamètre).

Il s'agit d'une caméra PHOTOMETRICS SENSYS achetée en 1999 fonctionnant au moyen d'une interface PCI équipée de la cible CCD KODAK KAF1600.

Puits de potentiel: 85000 e

Bruit de lecture: 20 e

Dynamique de 12 bits (4096 niveaux)

Rapport S/B à mi saturation: 200 environ = $(40000)^{1/2}$

1536 x 1024 pixels de 9 microns

Obturbateur mécanique à iris (pose minimale 30 ms)

Vitesse de lecture 1 MHz

Refroidissement par module Peltier à 10°C + ventilateur

Logiciel: V++ sous Windows 2000

Driver PVCAM

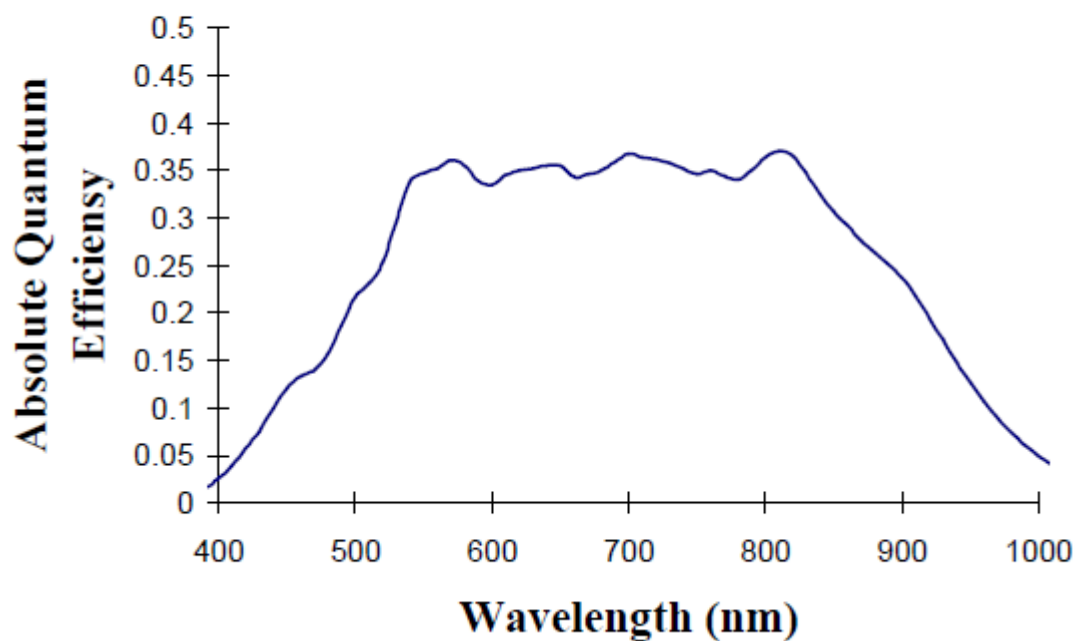
Langage de programmation: V-Pascal

Auteur des programmes: J.-M. Malherbe

Le programme pilote les barillets des prismes de champ au travers d'une liaison RS232.

Certains programmes sont capables de piloter un polarimètre à cristaux liquides ferroélectrique (FLC) ou à cristaux nématiques (NLC).

KAF-1600 Spectral Response



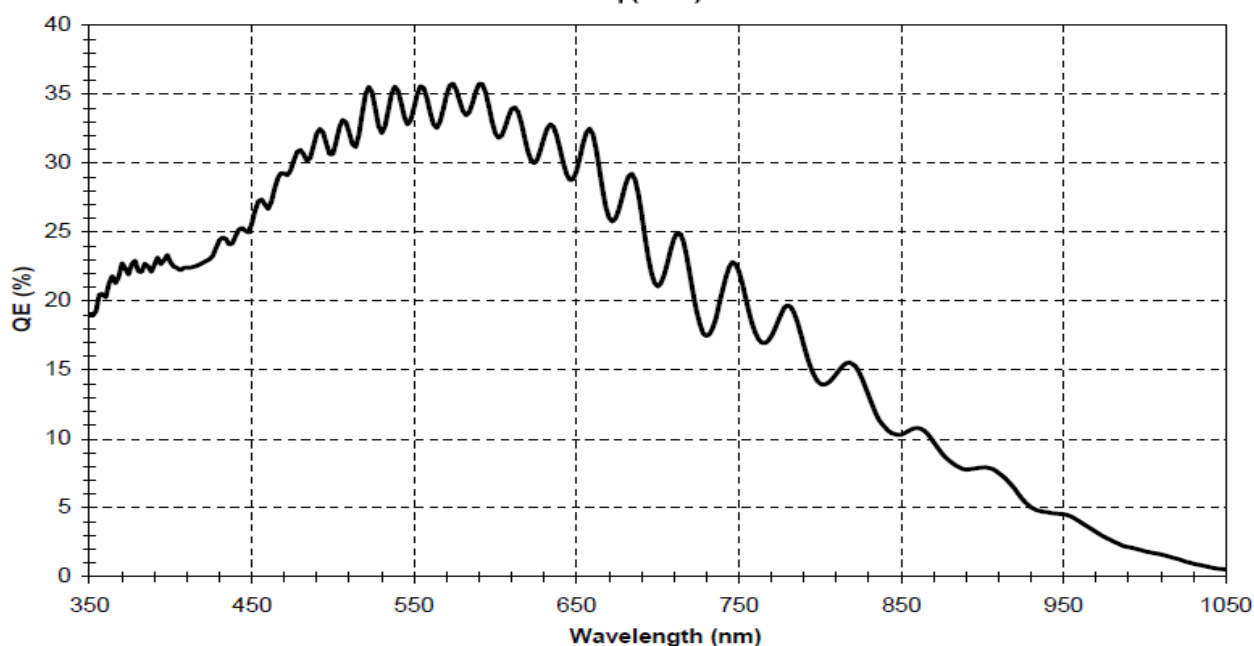
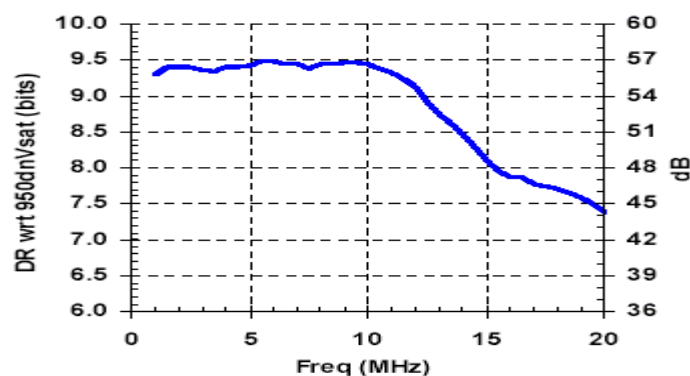
XIII - Imagerie large bande à la Tour Solaire de Meudon

1 - Montage

Lentille de champ de 400 mm au foyer du télescope
Objectif de 50 mm sur la caméra de réduction d'image
Filtre interférentiel 100 Å devant l'objectif
Pixel voisin de 0.2 arc sec (détail plus bas)
Champ de l'ordre de 1' x 1' (détail plus bas)

2 - Détecteur CMOS

Détecteur Kodak KAC1310 intégré à une caméra CMOS PIXELINK à température ambiante
Pixels de 6 microns, 1280 x 1024
10 bits ou 1024 niveaux de numérisation, saturation à 40000 e
1 niveau de numérisation = 40 e = 1 ADU
bruit de photons à mi saturation voisin de 140 e, soit 4 coups
bruit de lecture permanent à 70 e, soit 2 coups
bruit total voisin de 156 e
Dynamique $40000/70 = 570$ (10 bits)
rapport S/B approximatif à mi saturation voisin de 130
Vitesse maximale de lecture 8 MHz



Courbe de rendement quantique du capteur



Courbe de transmission du hublot devant le capteur (coupure à 650 nm)

3 - Logiciel de pilotage

Caractéristiques principales de la caméra :

Pixels de 6 μ , format 1280 x 1024 fenêtrable, puits de potentiel de 40000 électrons, 8MHz (lecture de 810^6 pixels/s), 10 bits (1024 niveaux)

Obturateur électronique (temps de pose minimum de 0.1 ms)

Programme d'acquisition spécifique à la Tour Solaire de Meudon développé par J.-M. Malherbe en VB5 + SDK version 3 sous Windows 2000

La dimension et la résolution sont consignées dans ce tableau:

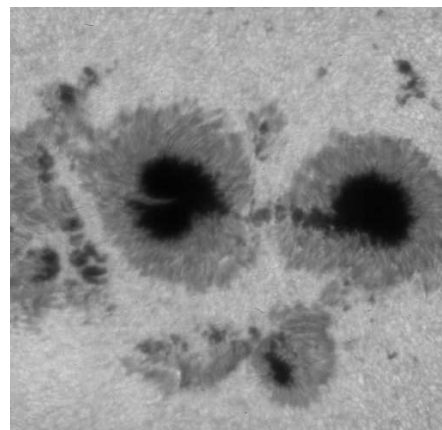
Format	décimation	Taille image	Champ	Résolution	Cadence maxi
1/1	1	1280 x 1024	100''	0.1''	5 images/s
1/1	2	640 x 512	100''	0.2''	20
1/1	4	320 x 256	100''	0.4''	80
1/2	1	640 x 512	50''	0.1''	20
1/2	2	320 x 256	50''	0.2''	80
1/2	4	160 x 128	50''	0.4''	320
1/4	1	320 x 256	25''	0.1''	80
1/4	2	160 x 128	25''	0.2''	320

Lecture sous IDL du format RAW 3D

```

Dimx = nombre de colonnes
Dimy = nombre de lignes
Dimz = nombre d'images
Tab=intarr(dimx,dimy,dimz)
Openr,10,'nom du fichier RAW'
Readu,10,Tab
Tab=Tab/64
Close,10

```

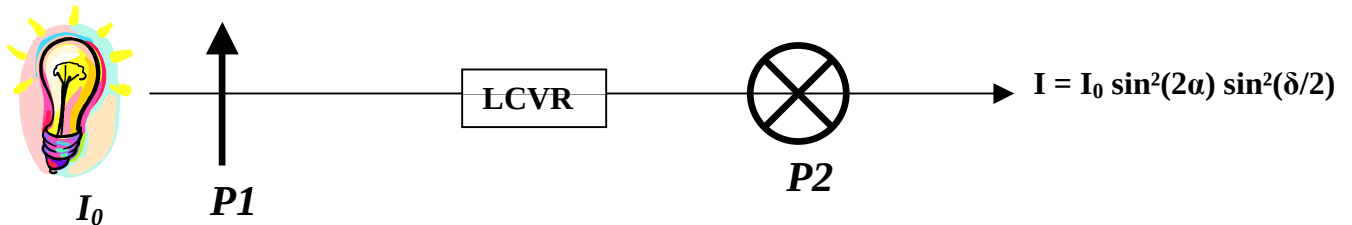


XIV - Banc de calibration des cristaux liquides à retard variable (LCVR) à la Tour Solaire de Meudon

1 – Alignement des axes

α est l'azimuth du cristal ; δ le retard du cristal ; on a $I = I_0 \sin^2(2\alpha) \sin^2(\delta/2)$

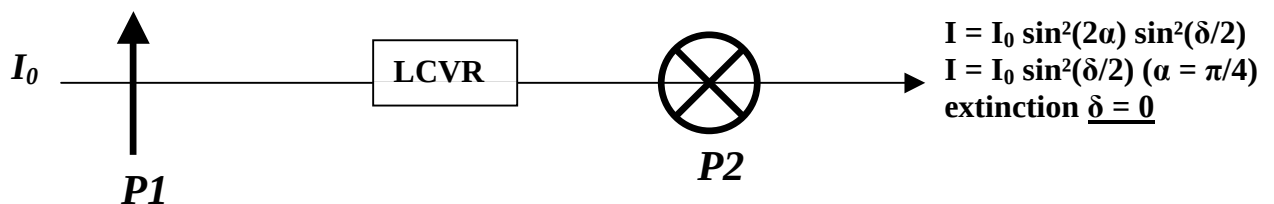
Eviter $\delta = 0$ et 2π ; extinction, donc parallélisme des axes avec P1/P2, pour $\alpha = 0$ modulo $\pi/2$



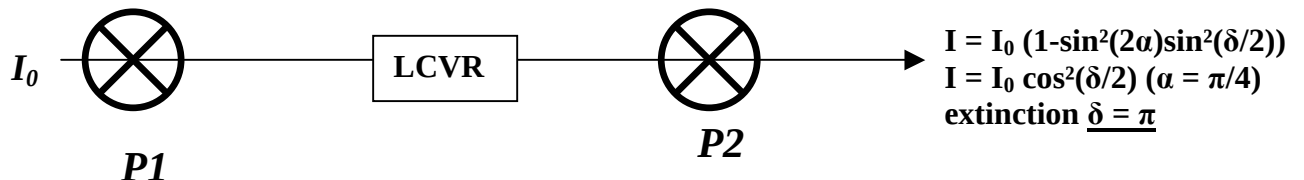
Tourner le LCVR de $\pi/4$ après avoir trouvé ses axes selon cette méthode

2 – calibration 0 et demi onde

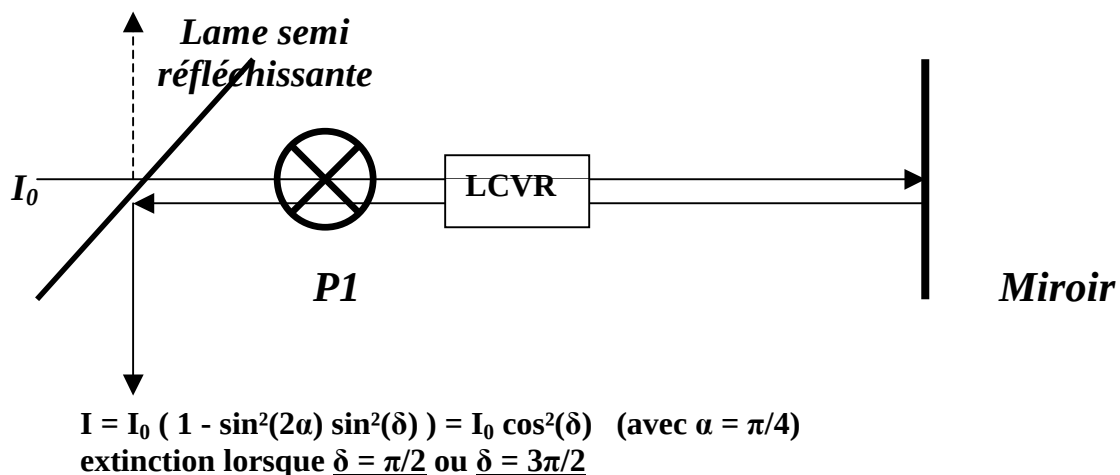
0 onde



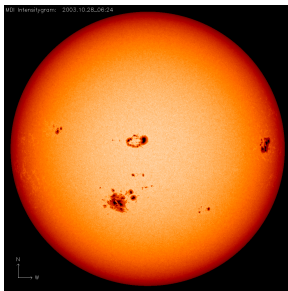
demi onde



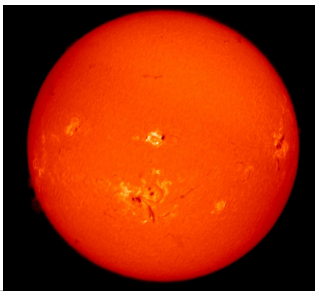
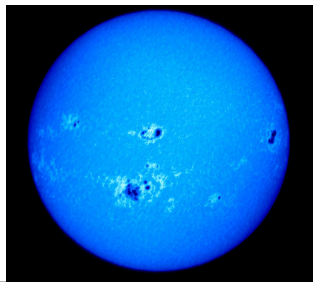
3 – calibration par autocollimation quart et trois quarts d'onde



Aspects multi longueur d'onde du soleil

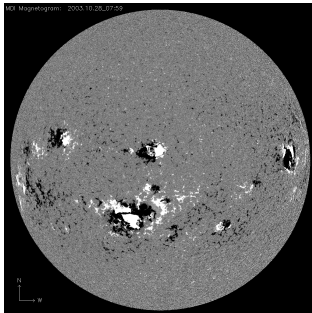


Photosphère en NiII et CaII

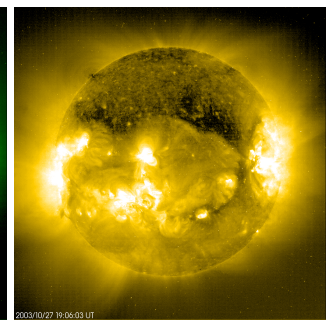
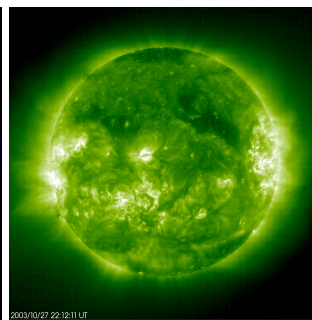
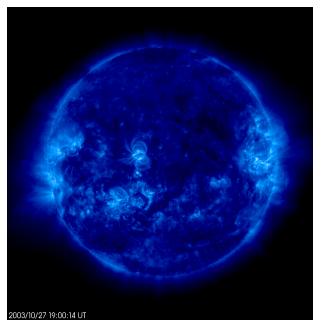
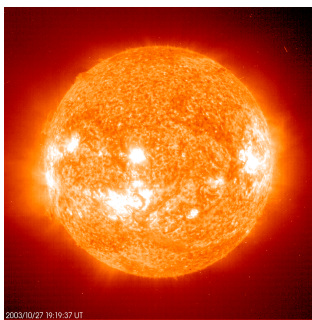


Chromosphère en H α

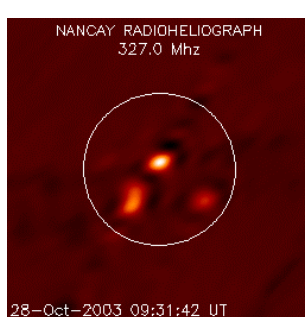
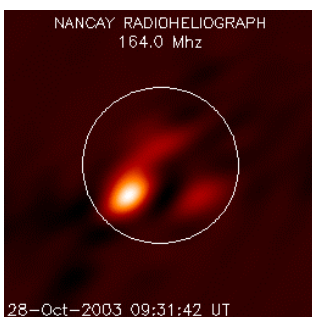
Les raies spectrales d'absorption du spectre de la lumière visible révèlent les basses couches de l'atmosphère dont la température varie entre 4500 et 8000 degrés, la photosphère et la chromosphère (Observatoires de Meudon et instrument MDI/SOHO)



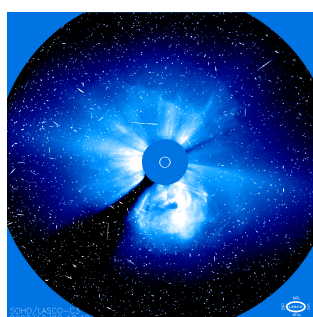
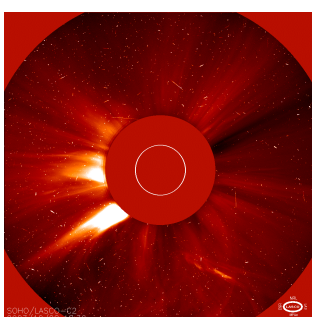
L'effet Zeeman sur les raies spectrales permet de mesurer les champs magnétiques dans la photosphère du soleil, qui sont à l'origine de l'activité de l'étoile (raie NiI, MDI/SOHO)



En UltraViolet, domaine réservé aux instruments en orbite, la basse couronne apparaît dans des températures qui vont de 80 000 à plus de 2 millions de degrés (instrument EIT/SOHO)



En ondes radioélectriques, on détecte le rayonnement des particules accélérées dans la couronne solaire (Radiohéliographe de Nançay, ondes métriques)



Les coronographes de SOHO, en lumière blanche, révèlent la couronne solaire à moyenne et grande distance (instrument LASCO/SOHO). Le disque du soleil est représenté par le cercle blanc et masqué par une « Lune artificielle ».