



**HAL**  
open science

## 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-00785323v1

**HAL Id: hal-00785323**

**<https://hal.science/hal-00785323v1>**

Preprint submitted on 5 Feb 2013 (v1), 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)

*Jean-Marie Malherbe, astronome, (\*)  
5 Février 2013*

**Historique**: un siècle d'observations quotidiennes à Meudon 2

#### **Instruments SO6**

Spectrohéliographe de Meudon	7
Ancien Héliographe H alpha de Meudon, 656.3 nm, dit "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

#### **Instruments hors SO6**

Tour Solaire, spectrographe classique en simple passage à fente fine	44
Tour Solaire, spectrographe à Double Passage Soustractif Multicanal	53
Tour Solaire, voie imagerie monochromatique (filtres)	59
Banc de calibration polarimétrique Tour Solaire	61

(\*) les deux 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 ( $10^6\text{K}$ ) 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](http://solaire.obspm.fr/images/documentation/Histoire_des_observations_solaires_Meudon.pdf)

et

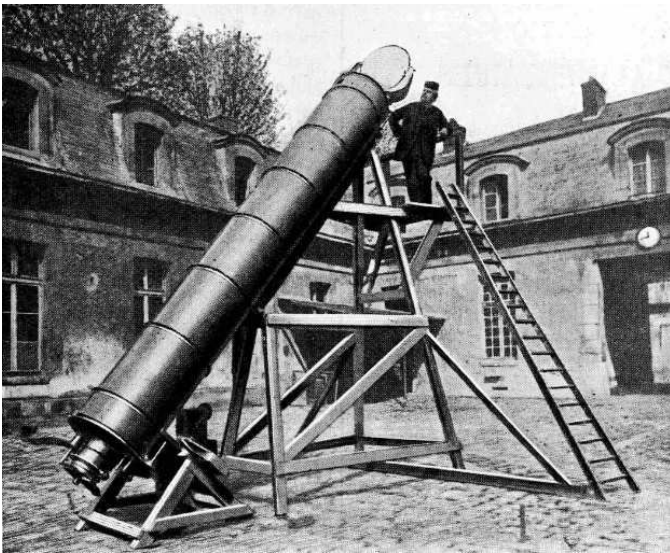
le site des observateurs <http://solaire.obspm.fr/>

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*

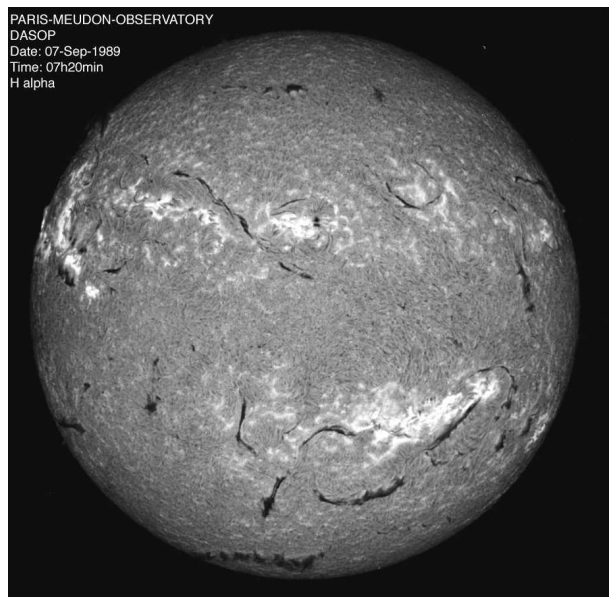


*L'éphémère Observatoire du Mont Blanc dura 15 ans ; il fut conçu et érigé à Meudon avant son transport en pièces détachées (des centaines de charges de porteurs !). La lunette de 12 pieds, dont l'axe devait garder une orientation fixe alignée sur l'axe du Monde, y fut montée en sidérostât polaire. Janssen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

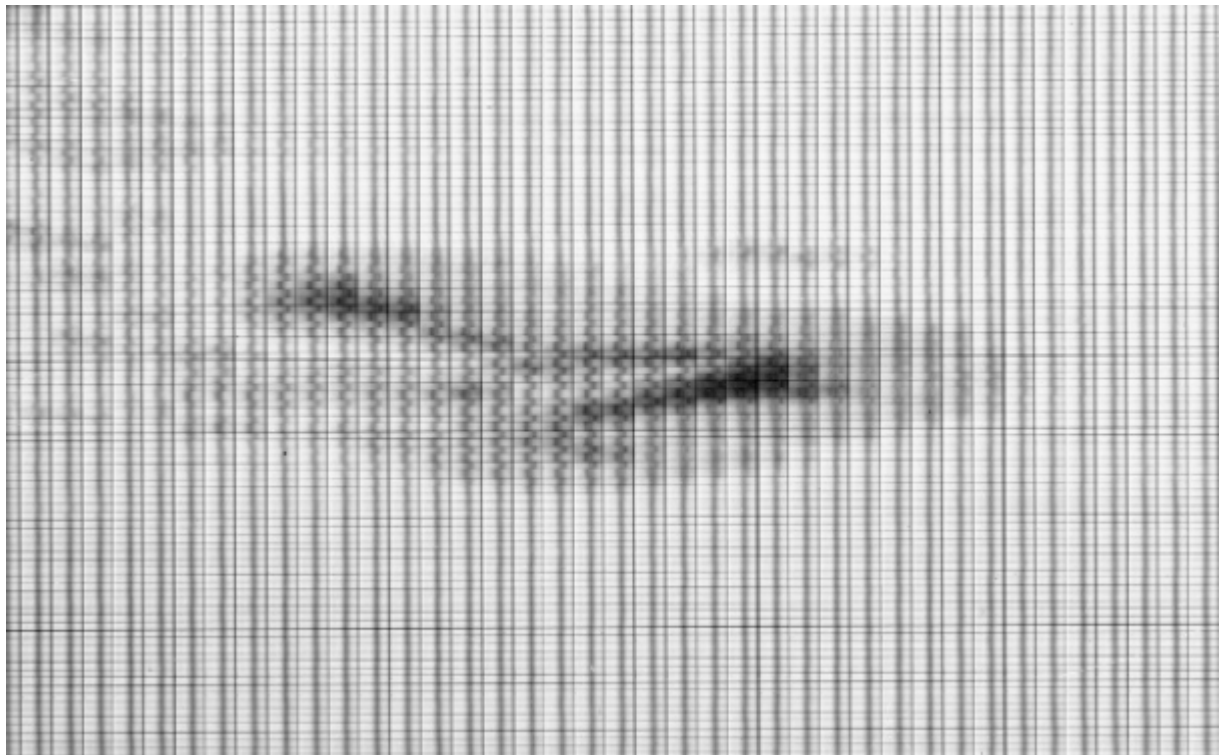


**Henri  
Deslandres**  
© Obs Paris

*Exemple de cliché solaire obtenu quotidiennement à Meudon (la chromosphère dans la raie H $\alpha$ ) 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*



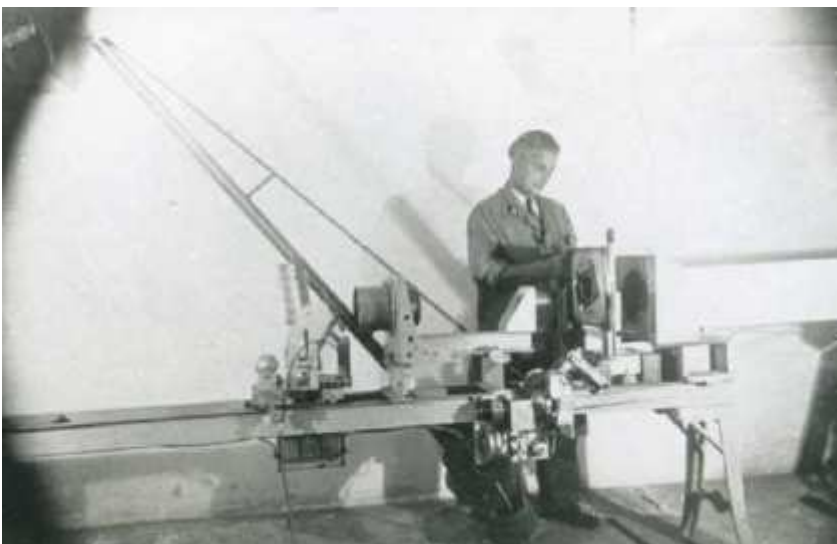
*Les premières observations spectro polarimétriques ont été réalisées à Meudon vers 1962 avec la grille de Hale contenant un matériau quart d'onde : les composantes circulaires droite et gauche de l'effet Zeeman sont mises en évidence sur la tache (lignes alternées) ; chaque colonne donne le spectre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



*Audoine 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*

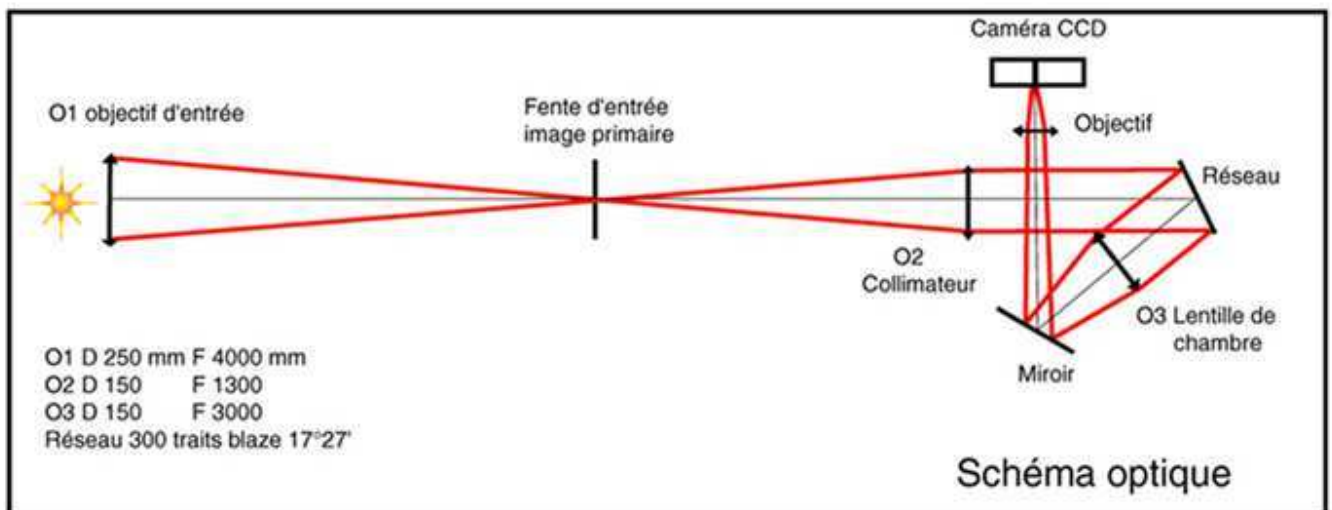


*Bernard Lyot (à gauche) et Lucien d'Azambuja (à droite) à Louksor en 1952 © Obs Paris*



*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 baze  $17^\circ$ . L'angle d'incidence sur le réseau vaut  $i = 7^\circ$ , et l'angle de diffraction est voisin de  $27^\circ$ .

### 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  $0.53^\circ$ , 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 $\alpha$  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  $\lambda$  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  $27^\circ$ .

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  $\mu$ , 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  $0.04^\circ$  correspondant à  $6.45 \cdot 10^{-4}$  rd. L'écart des deux raies dans le spectre est égal à  $\Delta i' \cdot f_2$ . 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 x 100; 26.8 x 2.0 mm overall; 20 x 20  $\mu$ m pixels; shift register along long axis for parallel mode spectroscopic detection

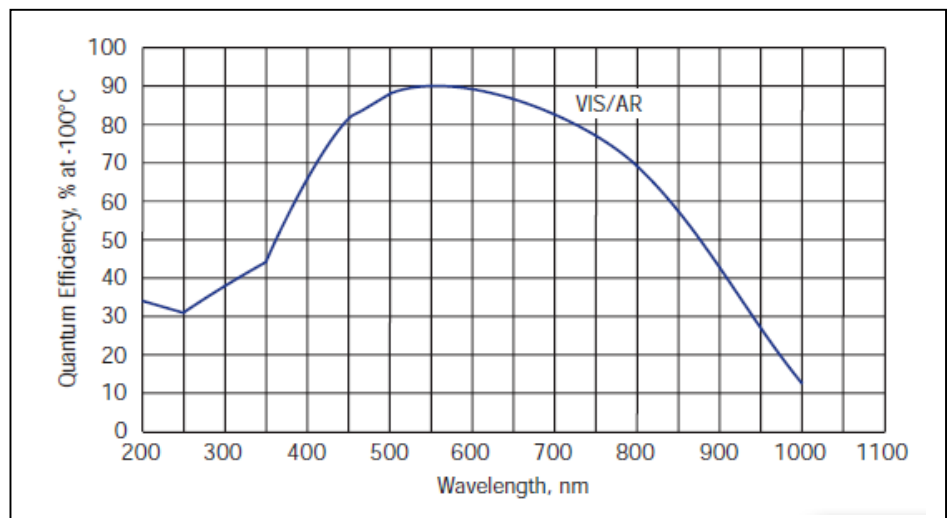
### Spectrometric Well Capacity

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  $200000 e / 12 e = 16000$  (14 bits), le bruit de lecture étant de l'ordre de 12 e.

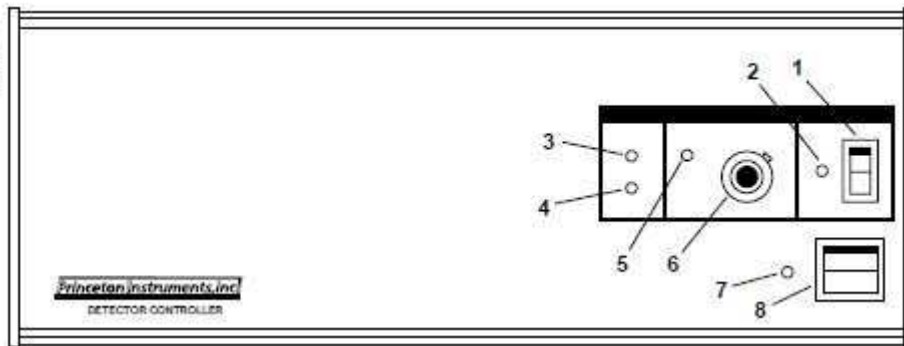
A mi saturation, le rapport S/B est excellent et d'environ  $300 = 100000^{1/2}$

Le capteur est refroidi à  $-40^\circ$  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.

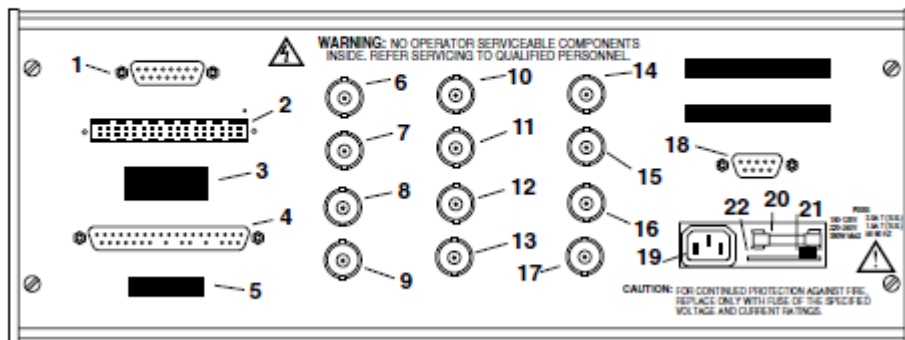
Figure 5.  
ST-138 front  
panel



### 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

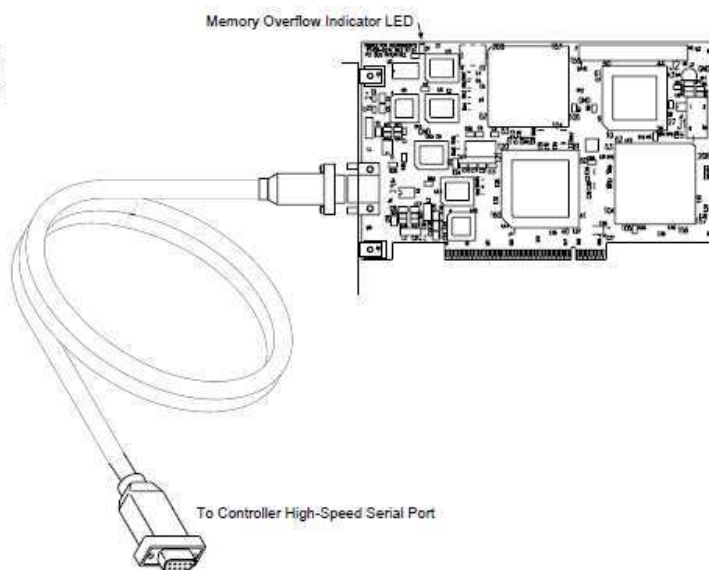
Figure 6.  
ST-138 rear  
panel



### 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 sélecteurs d'ordre

Le chariot mobile assure la translation de l'objectif d'entrée sans avoir à bouger le coélostate. Les filtres sélecteurs 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 $\alpha$ , soit la raie CaII K en se tradant 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.

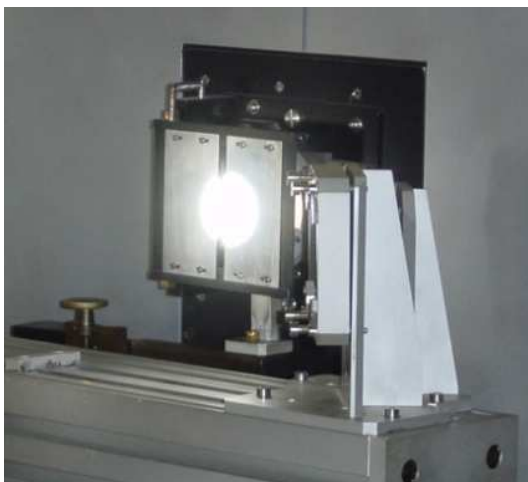
## 9 - Programme d'acquisition des données

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

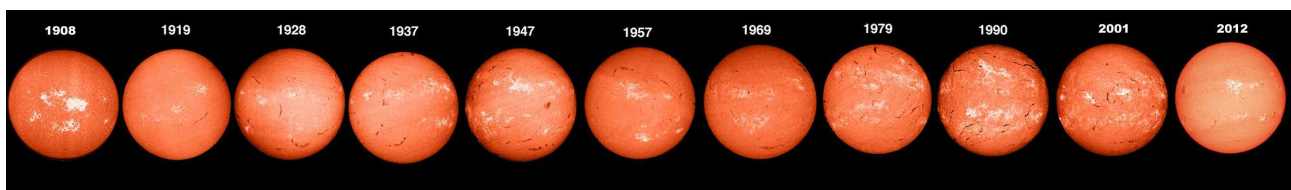
Il pilote le chariot porte objectif, le positionneur à filtres, la coulisse porte caméra et la caméra CCD. Le programme exécute WINVIEW, le logiciel de Princeton Instruments, en tâche de fond. Les images sont écrites en format TIF 16 bits.

## 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 $\alpha$  (USA, Big Bear) vient y puiser les images automatiquement via FTP.

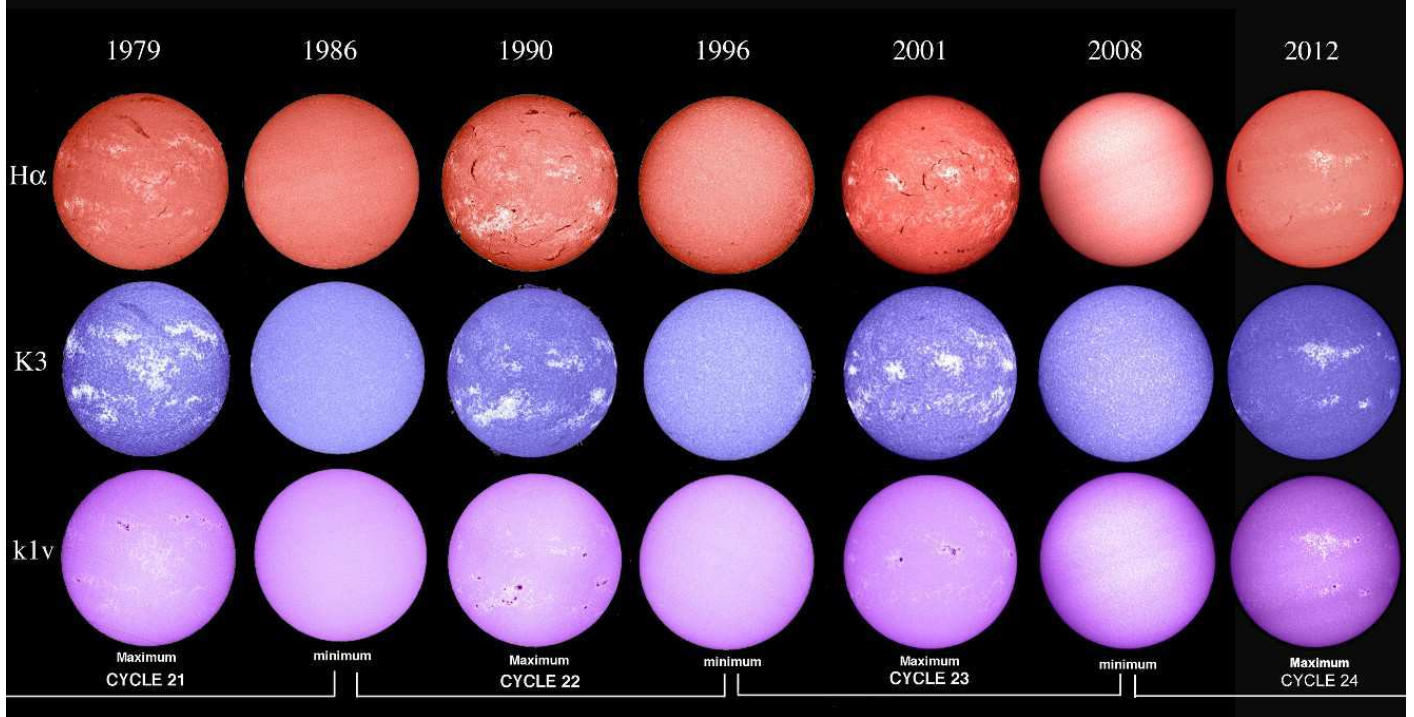


*Fente du spectrographe (à gauche) et miroirs du coélostate (à droite)*



*Cycles solaires en H $\alpha$  au spectrohéliographe*

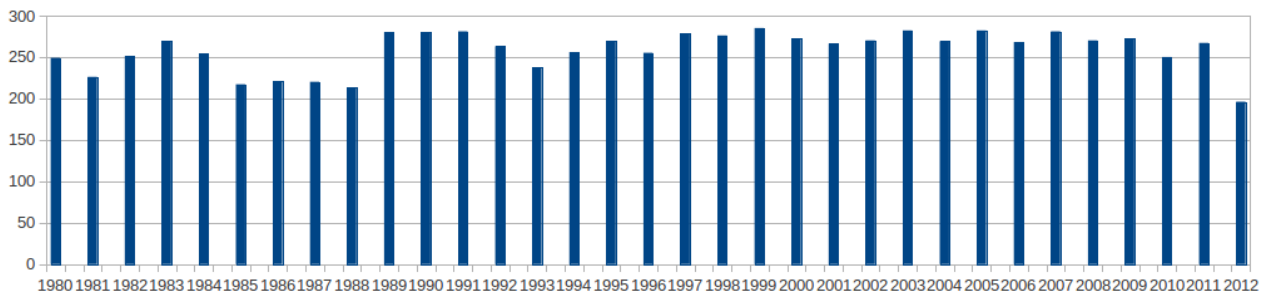
# CYCLES DE 11 ANS



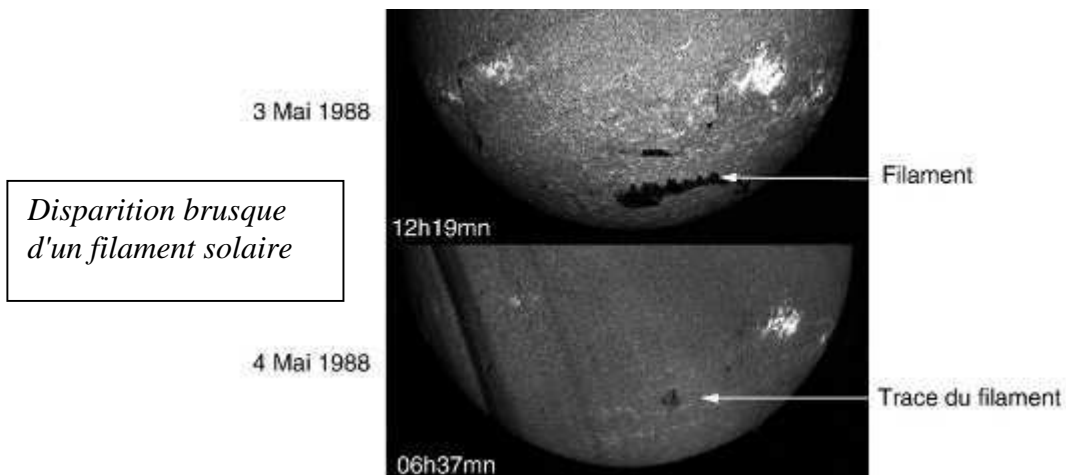
*10 cycles solaires ont été observés à Meudon avec le spectrohéliographe*

Nombre de jours d'observation Spectrohéliographe de Meudon

(source BASS2000)

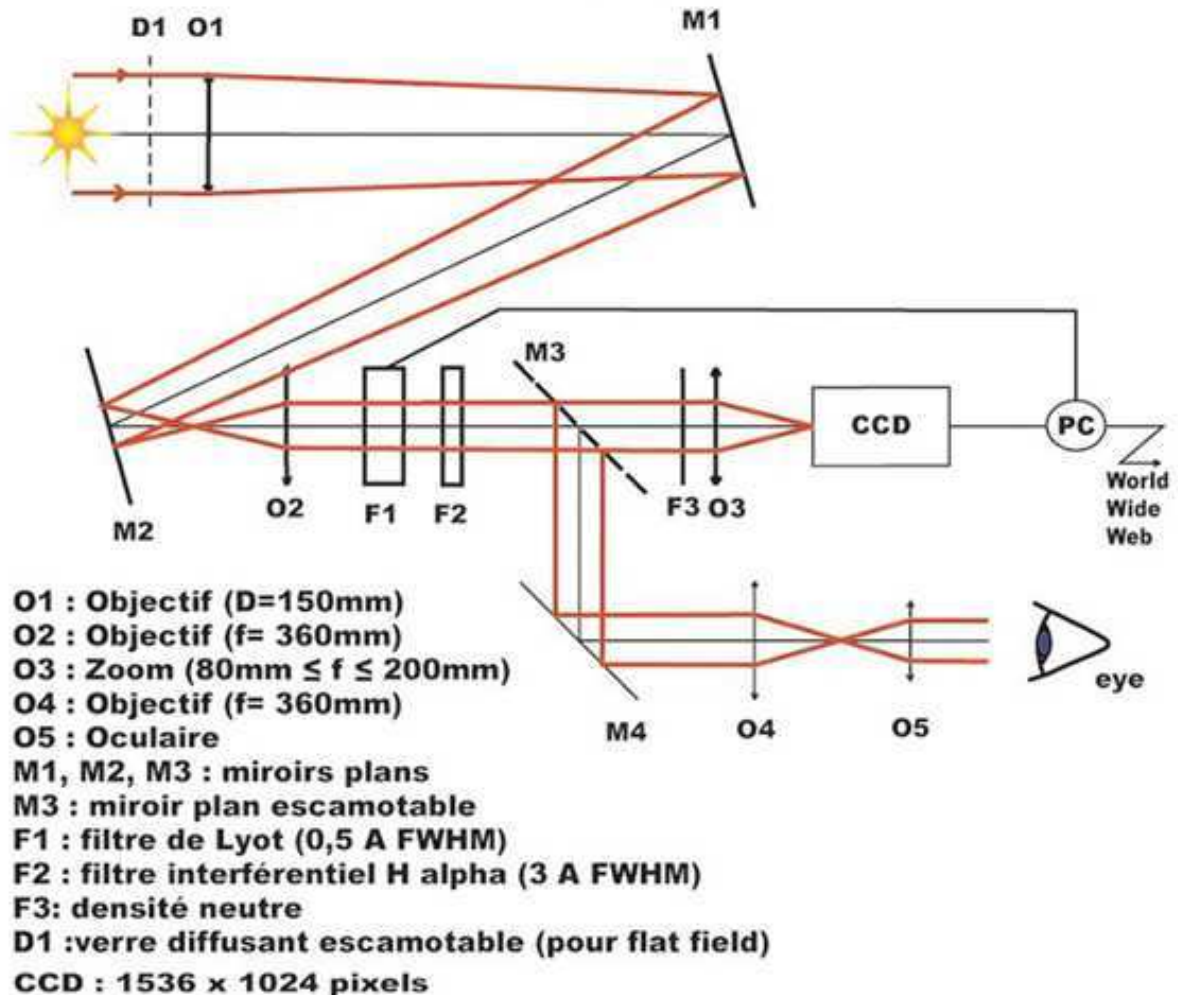


*Nombre de jours d'observation avec le spectrohéliographe, en moyenne 260 jours par an*



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

#### Schéma optique



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  $0.53^\circ$ , 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 $\alpha$  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 $\alpha$

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 \_\_\_\_\_

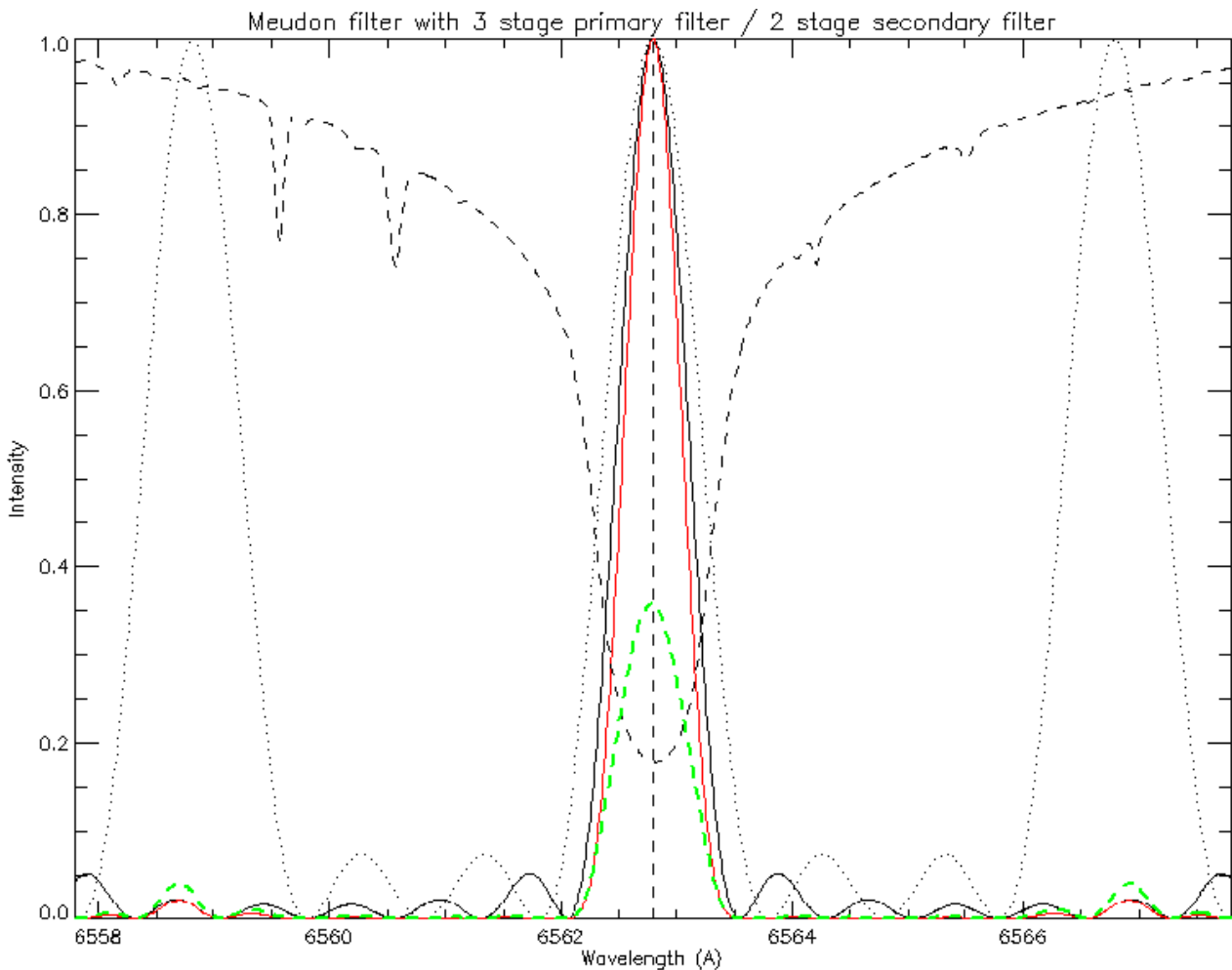
Trait pointillé = filtre secondaire à 2 étages .....

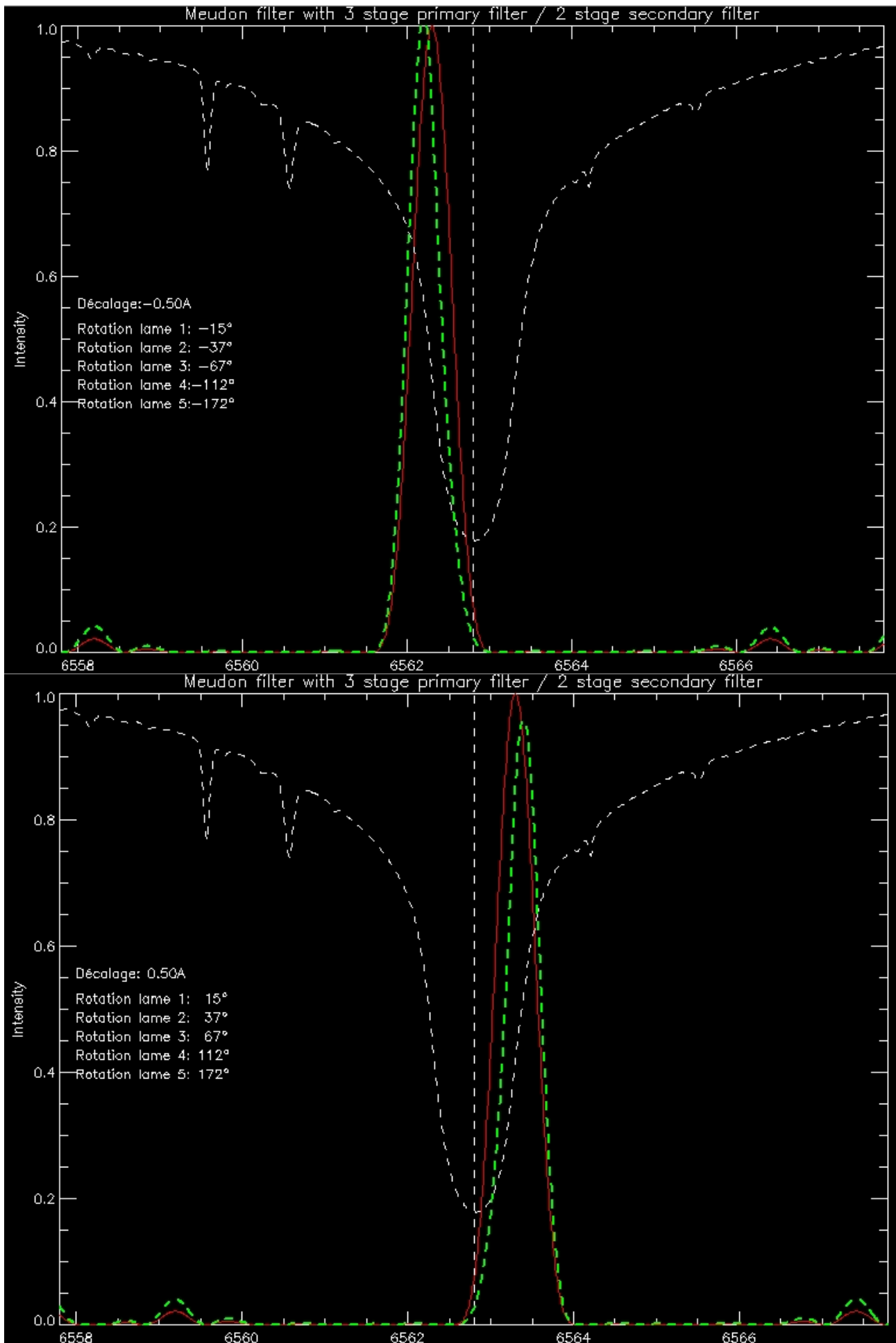
Trait continu rouge = filtre produit résultant de la combinaison primaire/secondaire \_\_\_\_\_

Tirets noirs = raie H $\alpha$  - - - - -

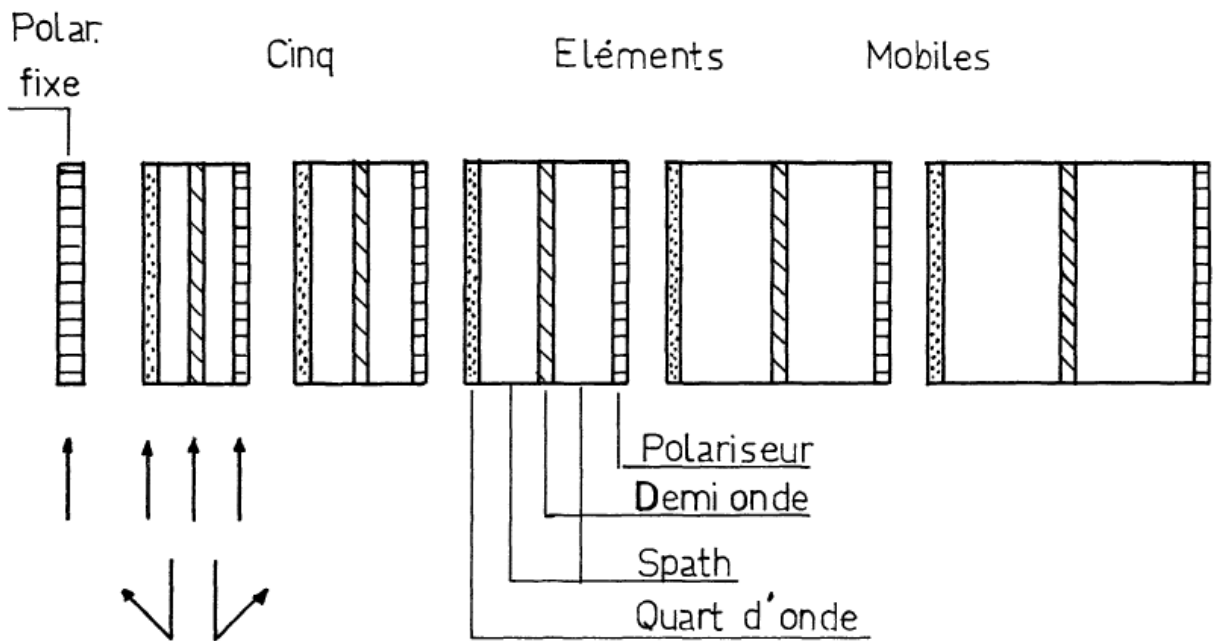
Tirets verts = raie H $\alpha$  vue au travers du filtre - - - - -

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.

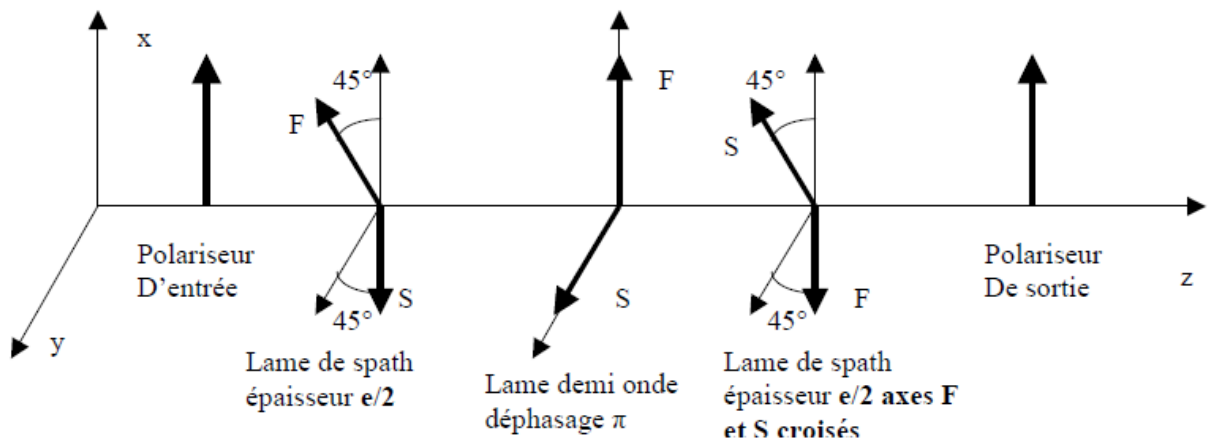








L'étage de LYOT à **grand champ** est basé sur l'utilisation de deux lames de spath de même épaisseur  $e/2$ , mais dont les axes optiques sont croisés, c'est à dire orthogonaux. L'astuce est la suivante : quand un rayon attaque la première lame sous azimuth nul, il est de  $\pi/2$  pour la seconde lame, 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).

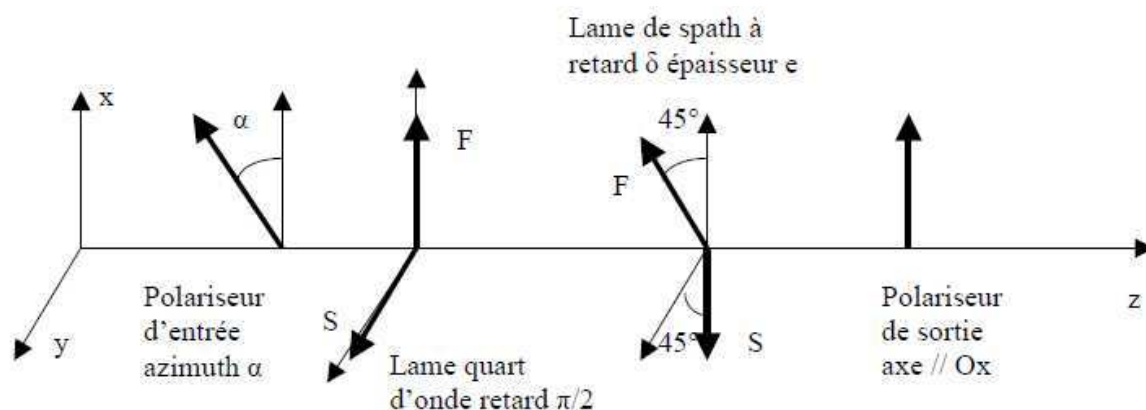
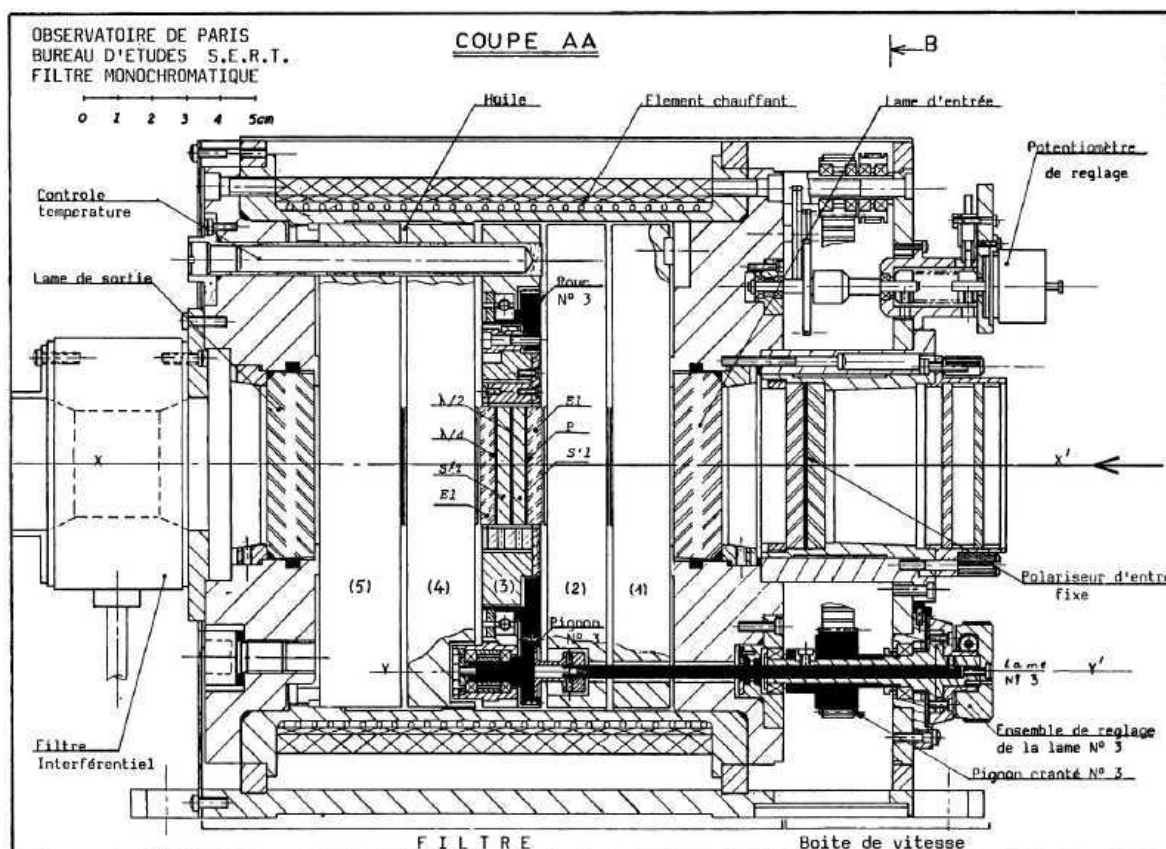


*Principe de l'étage de LYOT à grand champ*



*Etages de LYOT à grand champ*

Épaisseur des lames	Rapports	Rotations
4 191,3	1	1°
6 287,0	1,5	1 + 1,5
8 382,7	2	2,5 + 2 ou 2,5 + (1,5 × 1,333)
12 574,0	3	4,5 + 3 ou 4,5 + (2 × 1,5)
16 765,3	4	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 reliée 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  $\alpha$  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  $\alpha$ . D'un étage de LYOT au suivant,  $\alpha$  sera proportionnel à l'épaisseur de l'étage, c'est à dire en puissance de 2, comme le retard  $\delta$ .

**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  $\alpha$  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  $\beta$  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**

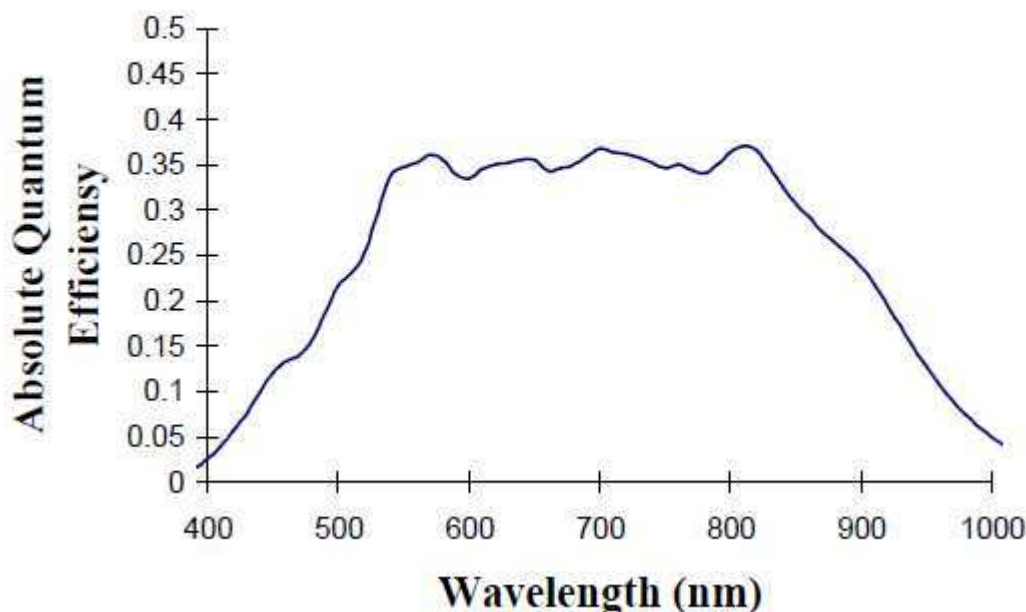
20 electrons at 1 MHz

**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  $85000 e / 20 e = 4000$  (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  $-20^\circ$  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  $46^\circ$

### **7 - Programmes d'acquisition et de traitement**

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

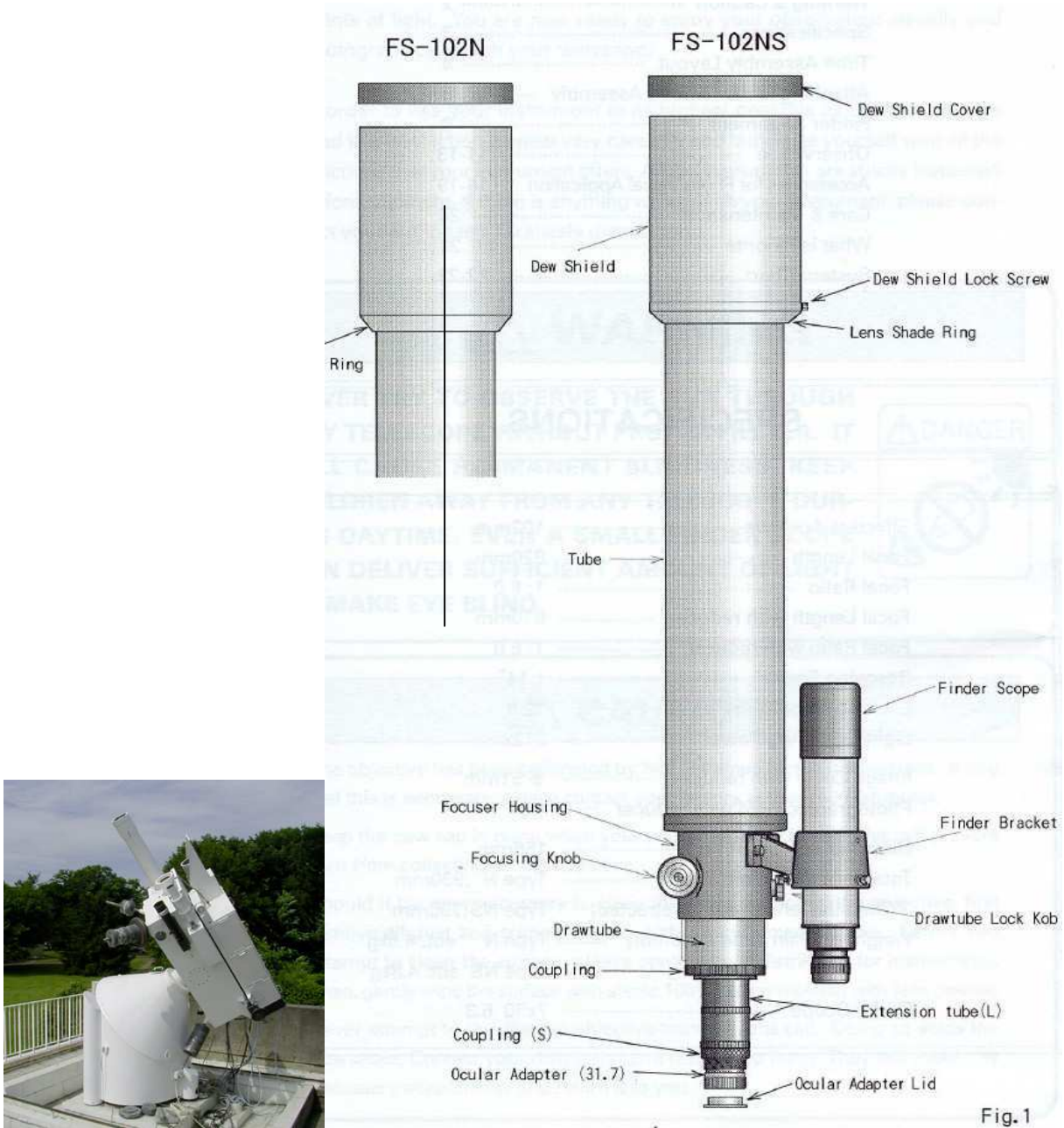
Il pilotait la commande du filtre et la caméra CCD. Le programme exécute WINVIEW, le logiciel de Princeton Instruments, en tâche de fond. Les images sont écrites en format FITS 12 bits.

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



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

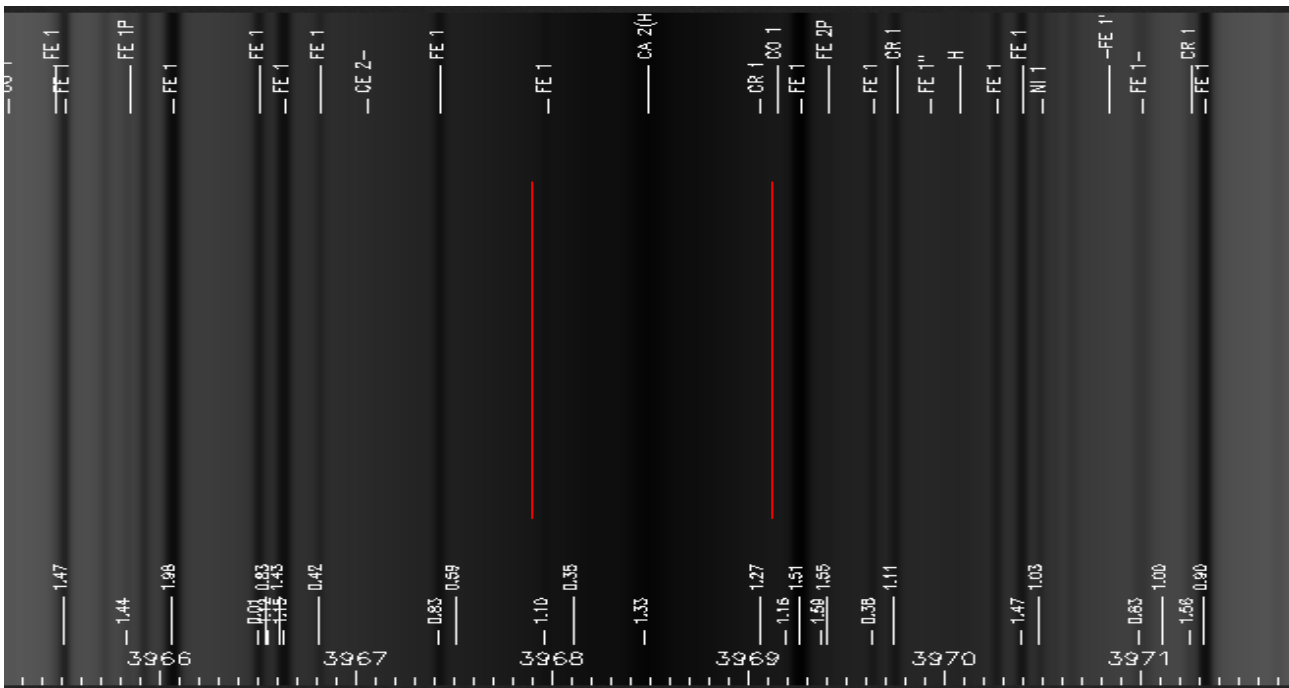
Lunette fluorite à deux verres (doublet apochromatique) de marque Takahashi, modèle FS102N,  $D = 102$  mm,  $F = 820$  mm.

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 =  $2.5^\circ$ ).

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  $1.2 \text{ \AA}$  à mi-hauteur. Ce filtre fait 25 mm de diamètre. Il est centré correctement pour la température de  $23^\circ\text{C}$  sur 396.85 nm en

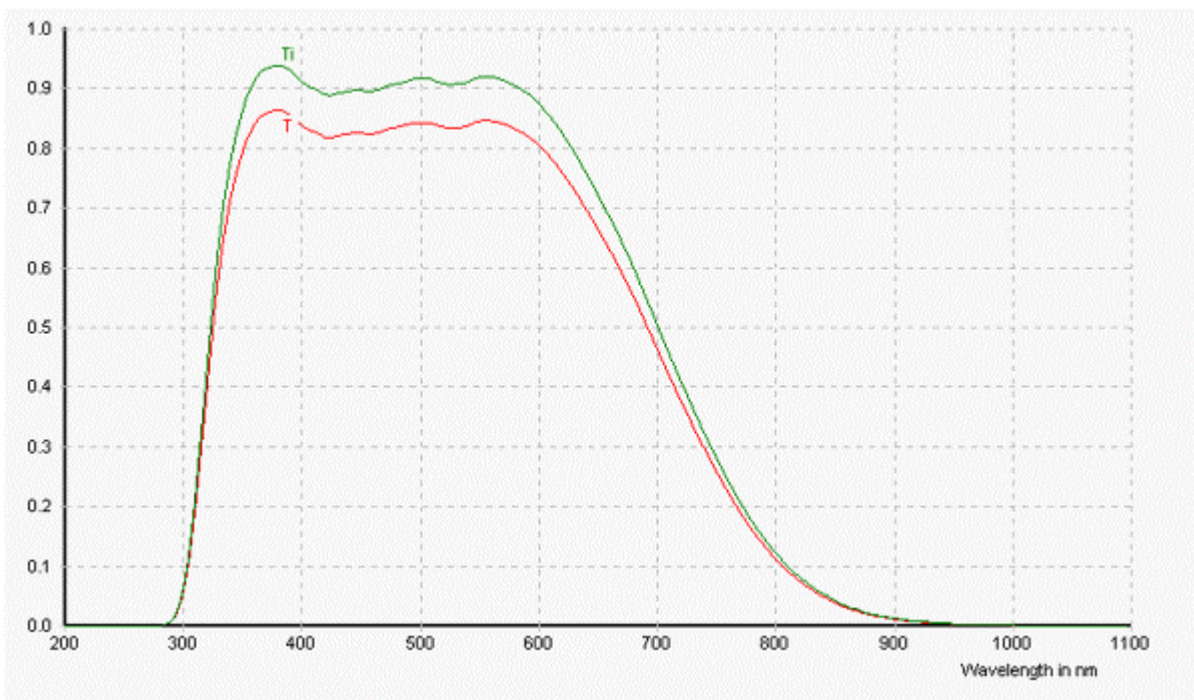
faisceau collimaté (396.80 pour un cône de demi angle 2.5°). Le constructeur donne une dérive très faible de 0.02 Å par °C de la bande passante.

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.

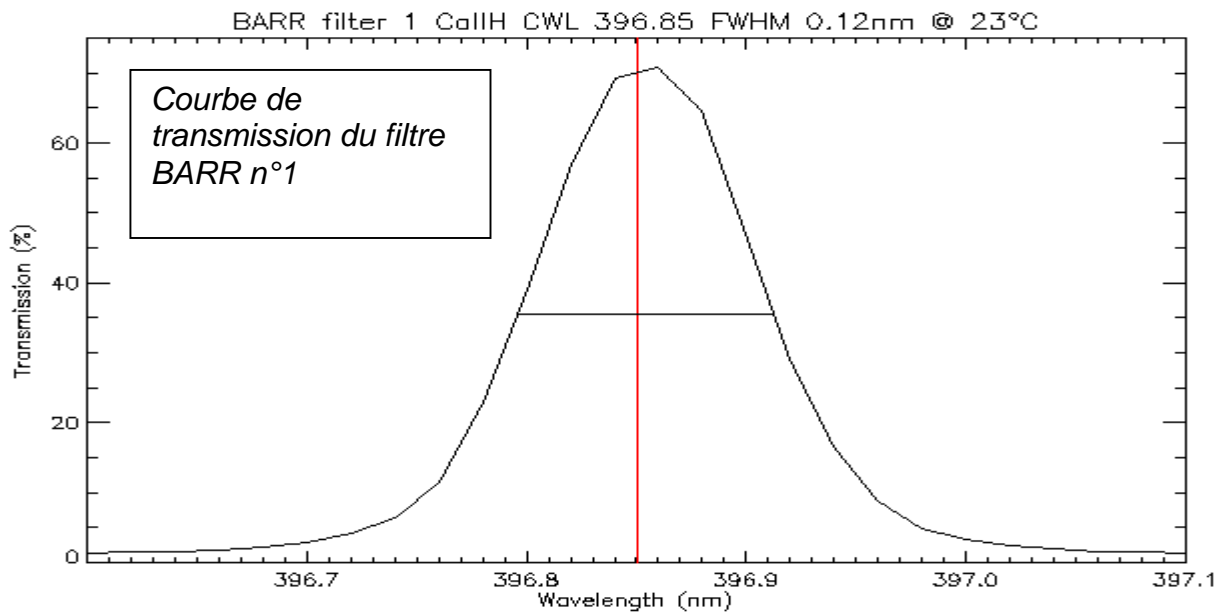
2 filtres ont été commandés. Le filtre 1 est monté sur la lunette.

Observatoire de Paris (PO#: L 25031/CI, Barr#: 53718)

P/N: 396.85/0.15nm

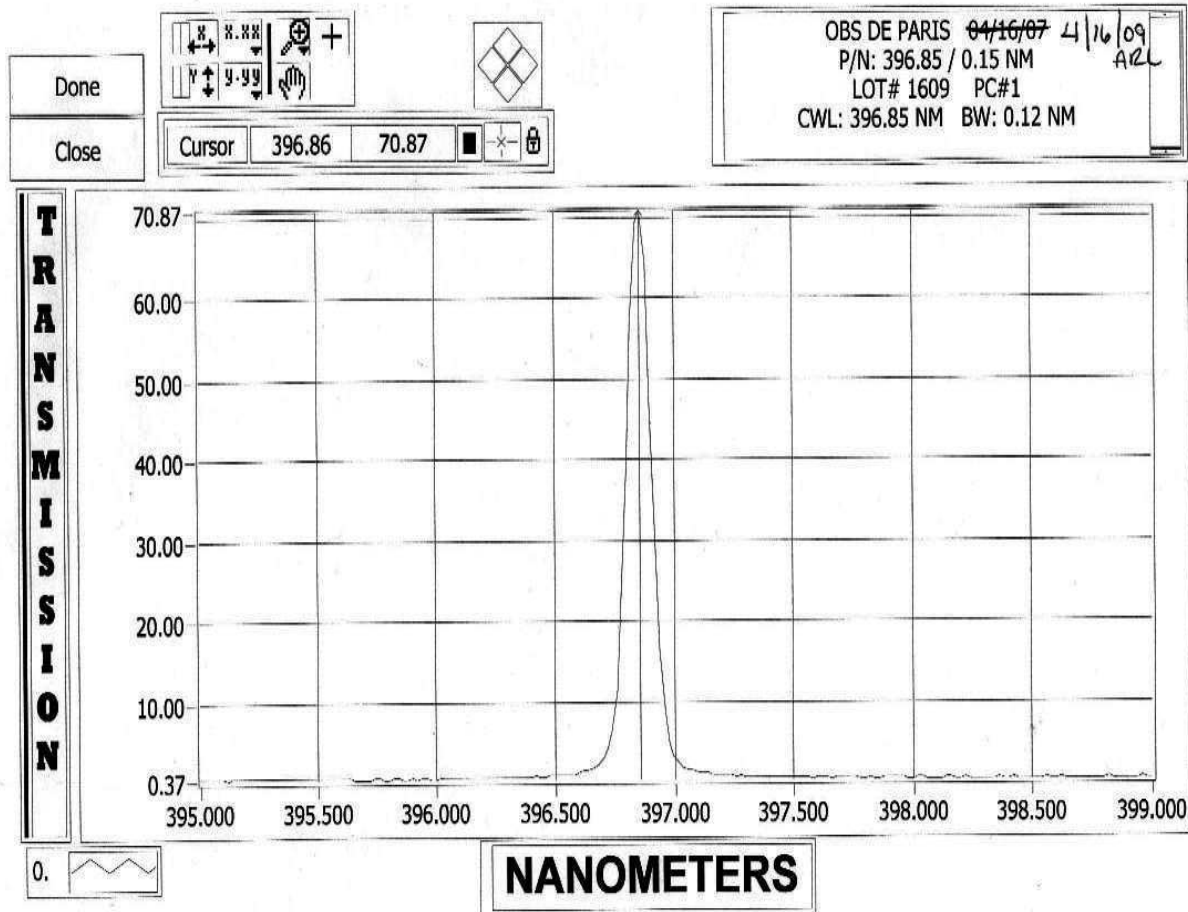
Lot#: 1609

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*

## McPherson Spectrometer Instrument Panel



*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<sup>-</sup>

A mi saturation, on a 10000 e<sup>-</sup> par pixel environ

Bruit de lecture 24 e<sup>-</sup>, bruit de photons à mi saturation voisin de 100 e<sup>-</sup>

Bruit global =  $(24^2 + 100^2)^{1/2} = 103$  e<sup>-</sup> 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<sup>-</sup> 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

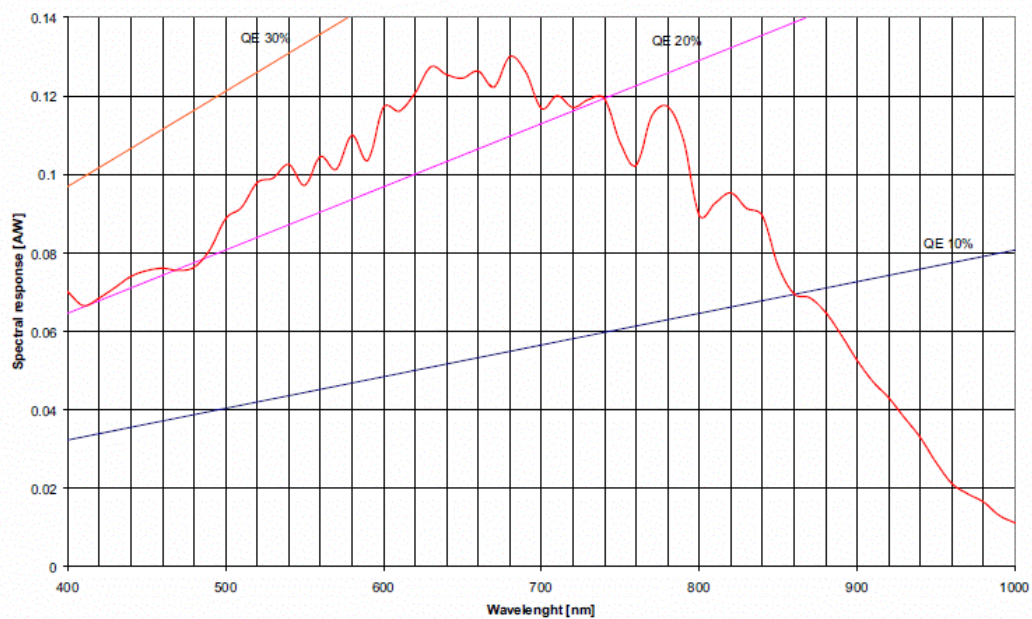
Parameter	Specification	Remarks
FPN (local)	<0.20%	RMS% of saturation signal
PRNU (local)	<1.5%	RMS of signal level
Conversion Gain	Conversion Gain	At output (measured)
Output Signal Amplitude	0.6V	At nominal conditions
Saturation Charge	21.500 e <sup>-</sup>	
Sensitivity (peak)	411 V.m <sup>2</sup> /W.s 4.83 V/lux.s	At 650 nm (85 lux = 1 W/m <sup>2</sup> )
Sensitivity (visible)	328 V.m <sup>2</sup> /W.s 2.01 V/lux.s	400-700 nm (163 lux = 1 W/m <sup>2</sup> )
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 <a href="#">Spectral Response Curve</a> on page 3.
Fill Factor	35%	Light sensitive part of pixel (measured)
Dark Current	3.37 mV/s 78 e <sup>-</sup> /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 <sup>-</sup> /s	Dark current RMS value (at 21°C)
Temporal Noise	24 RMS e <sup>-</sup>	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.

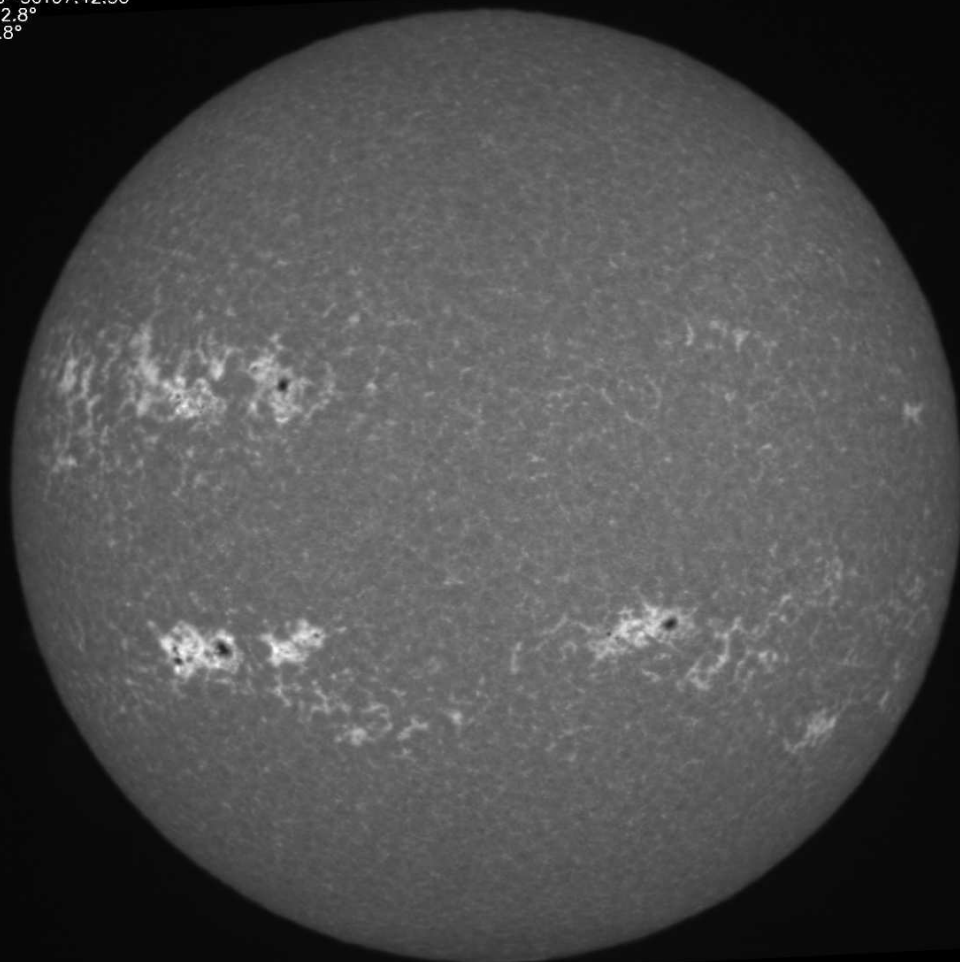
Figure 2. Spectral Response Curve



**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

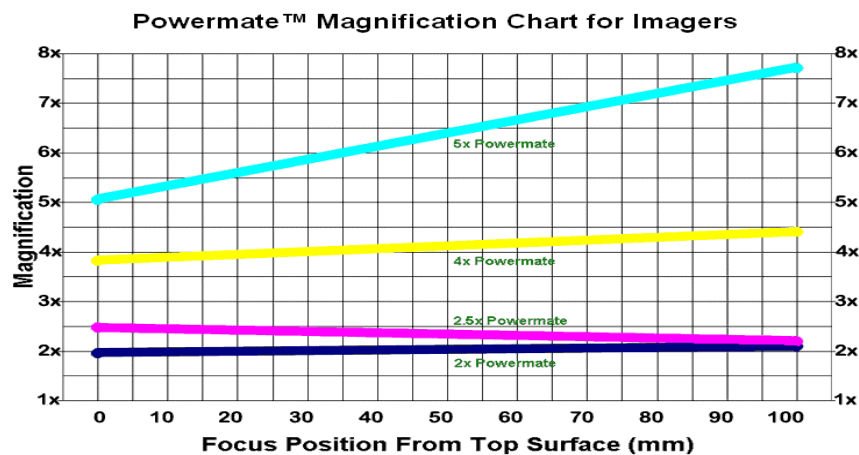


L'objectif de cet instrument est de surveiller l'activité solaire au niveau chromosphérique dans la raie K du Calcium à 393.7 nm (intégration sur le profil au voisinage du coeur de raie)

### 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).



For astro-imagers, the above chart indicates the magnification for each Powermate™ (2x, 2.5x, 4x & 5x) as a function of distance from the Powermate™ top surface to the imaging surface (CCD or film).

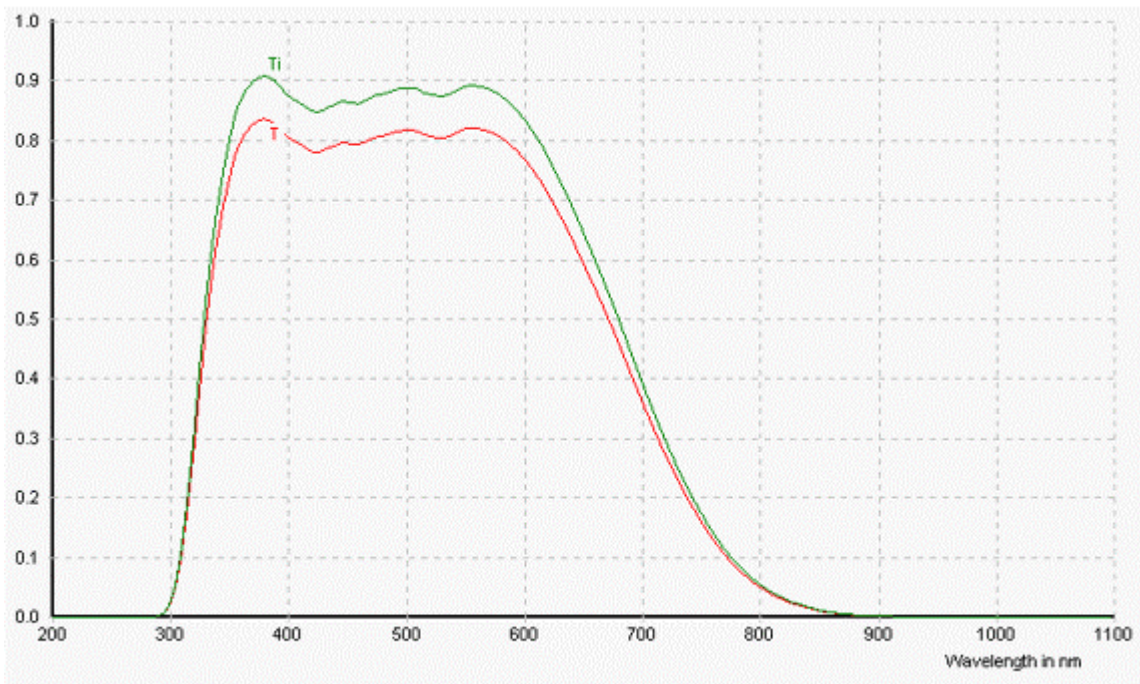
Un filtre anti calorique KG5 d'un diamètre de 70 mm est placé devant l'objectif en pleine ouverture et définit la pupille d'entrée de la lunette (diaphragme).

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.

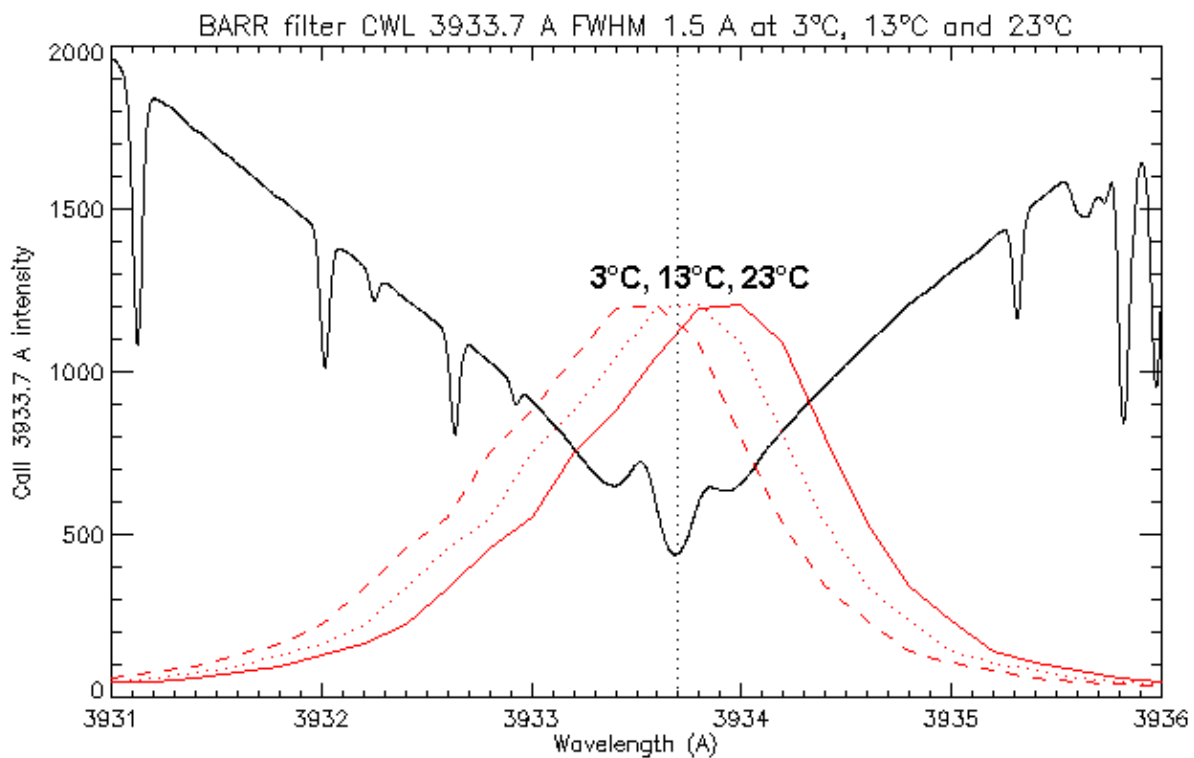
## 2 - Transmission du filtre anti-calorique KG5 en pleine ouverture



*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 # <b>1</b> CWL_col (nm) <b>393.37</b> CWL_1.25° (nm) <b>393.36</b> FWHM (nm) <b>0.14</b> Peak %T <b>59.4</b>		Blocking 200-1200nm	
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<sup>-</sup>

A mi saturation, on a 20000 e<sup>-</sup> par pixel environ

Bruit de lecture 10 e<sup>-</sup> à 5 MHz, bruit de photons à mi saturation voisin de 140 e<sup>-</sup>

Bruit global =  $(10^2 + 140^2)^{1/2} = 140$  e<sup>-</sup> 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)

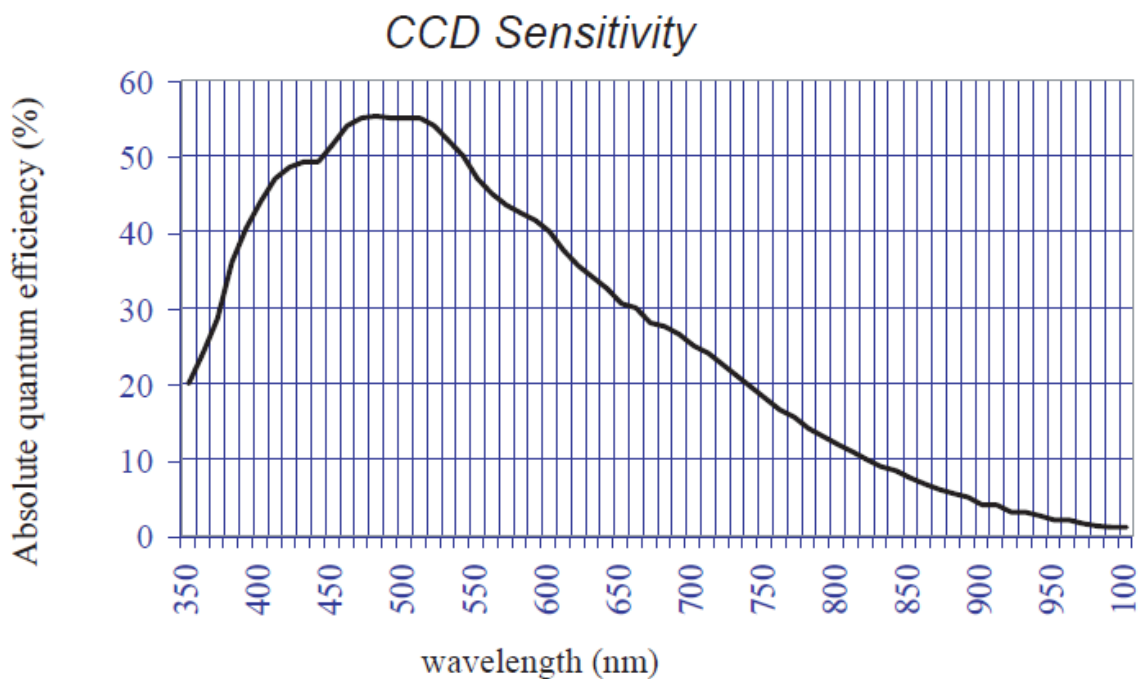
Vitesse de lecture utilisée de 5 MHz

Conversion A/D: 10 e<sup>-</sup> 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*

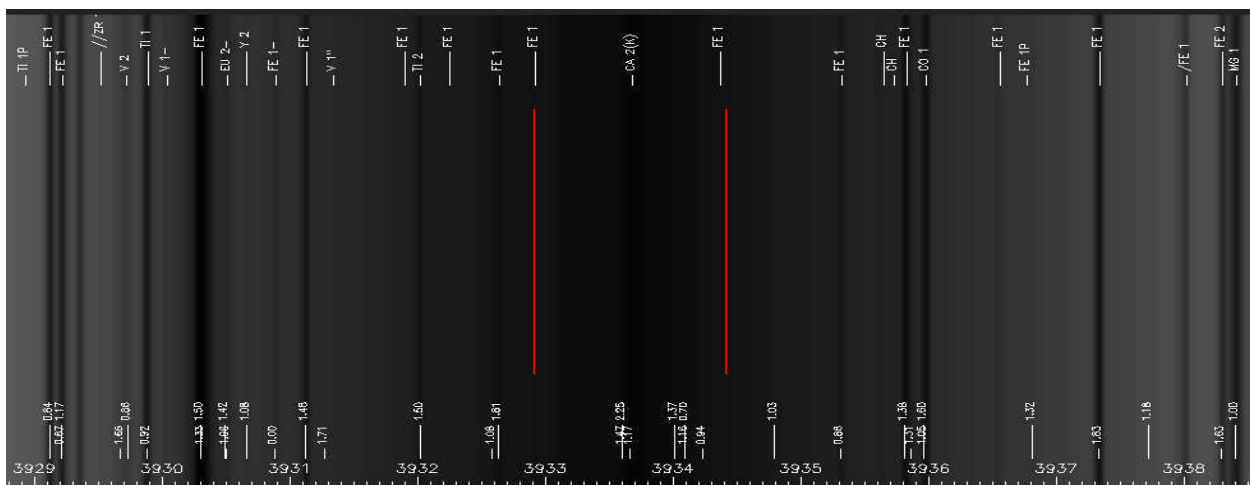
<b>CCD</b>	Kodak KAI-4020M
<b>Array Size (pixels)</b>	2048 x 2048
<b>Pixel size</b>	7.4 x 7.4 microns
<b>Imaging area</b>	15.15 x 15.15 mm (229.7 mm <sup>2</sup> )
<b>Imaging diagonal</b>	21.43 mm
<b>Linear Full Well (typ.)</b>	40,000 e <sup>-</sup>
<b>Dynamic Range</b>	> 77 dB
<b>QE @ 400 nm</b>	45%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

<b>PC Interface</b>	USB 2.0
<b>Max. cable length</b>	5 meters between hubs; 5 hubs maximum (max. total of 30m)
<b>Digital resolution</b>	12 bits at 5 MHz and 16 bits at 1 MHz
<b>System Noise (typ.)</b>	15 e <sup>-</sup> RMS at 10 MHz; 8 e <sup>-</sup> RMS at 1 MHz
<b>Pixel Binning</b>	1x1 to 10 x 2048 on-chip
<b>Exposure Time</b>	50 microseconds to 183 minutes (2.56 microsecond increments)
<b>Image Sequencing</b>	1-65535 image sequences under software control
<b>Frame Sizes</b>	Full frame, subframe, focus mode
<b>Cooling</b>	Thermoelectric cooler with forced air. Maximum cooling 45° C below ambient temperature. Programmable fan speed.
<b>Dark Current (nom.)</b>	0.2 e <sup>-</sup> /pixel/sec (-25° C)
<b>Temperature Stability</b>	±0.1° C
<b>Camera Head Size</b>	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)
<b>Mounting</b>	3.5" bolt circle. 2" 24 threads-per-inch. Optional Nikon or Canon lens mount.
<b>Back focal distance</b>	Standard: 1.025" (2.60 cm). Low profile: 0.456" (1.158 cm) [optical]
<b>Operating Environment</b>	Temperature: -22° to 27°C. Relative humidity 10 to 90% noncondensing
<b>Cable length</b>	Standard: 15 ft (4.5m)
<b>Power</b>	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.
<b>Shutter</b>	Electronic (optional electromechanical shutter)
<b>Remote Triggering</b>	LVTTL input to camera allows exposure start within 25 microseconds of rising edge of trigger

## 7 - Acquisition et traitement

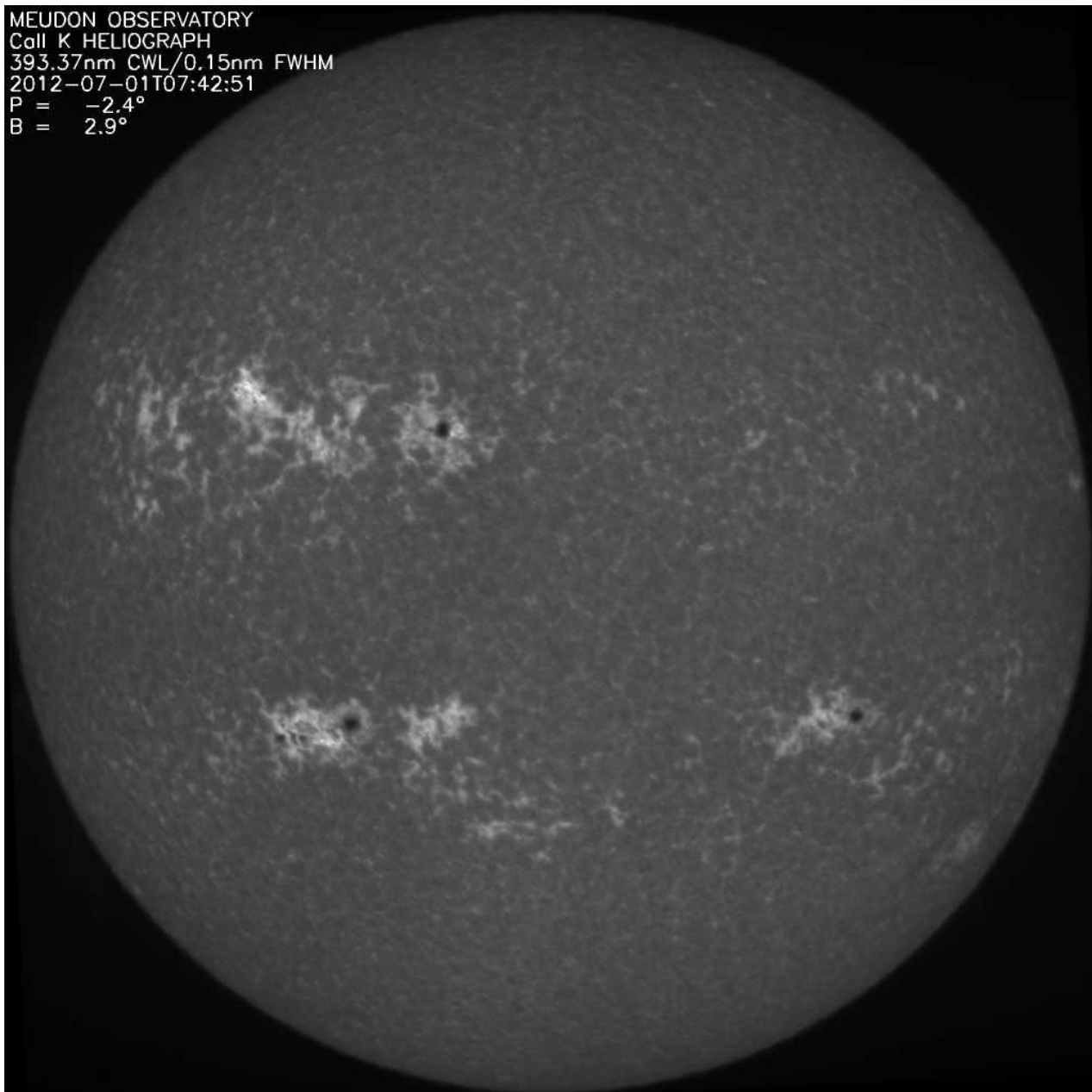
Les acquisitions sont faites à partir d'un ordinateur de type PC sous Windows XP par le logiciel commercial MAXIM DL. Il génère des fichiers FITS.

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

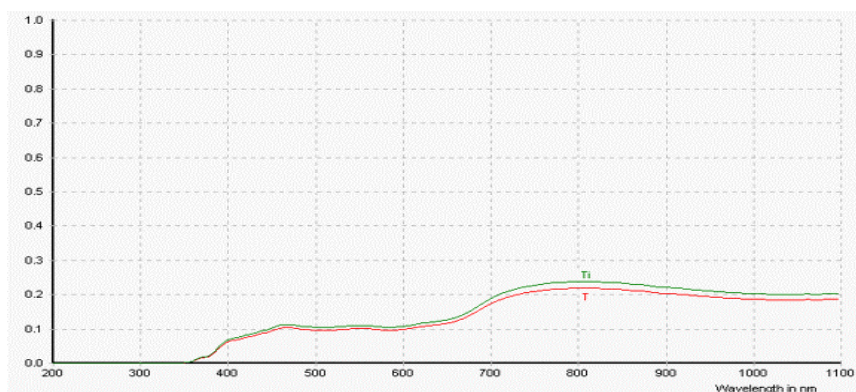
Le premier instrument était un objectif SIGMA de 400 mm de focale avec un multiplicateur x 1.4, donnant une focale  $F = 560$  mm avec un filtre Andover Corporation installé en pleine ouverture. L'instrument 2 lui a vite succédé, et nous ne présenterons que cette configuration dans les détails.

### 2 - Instrument 2

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

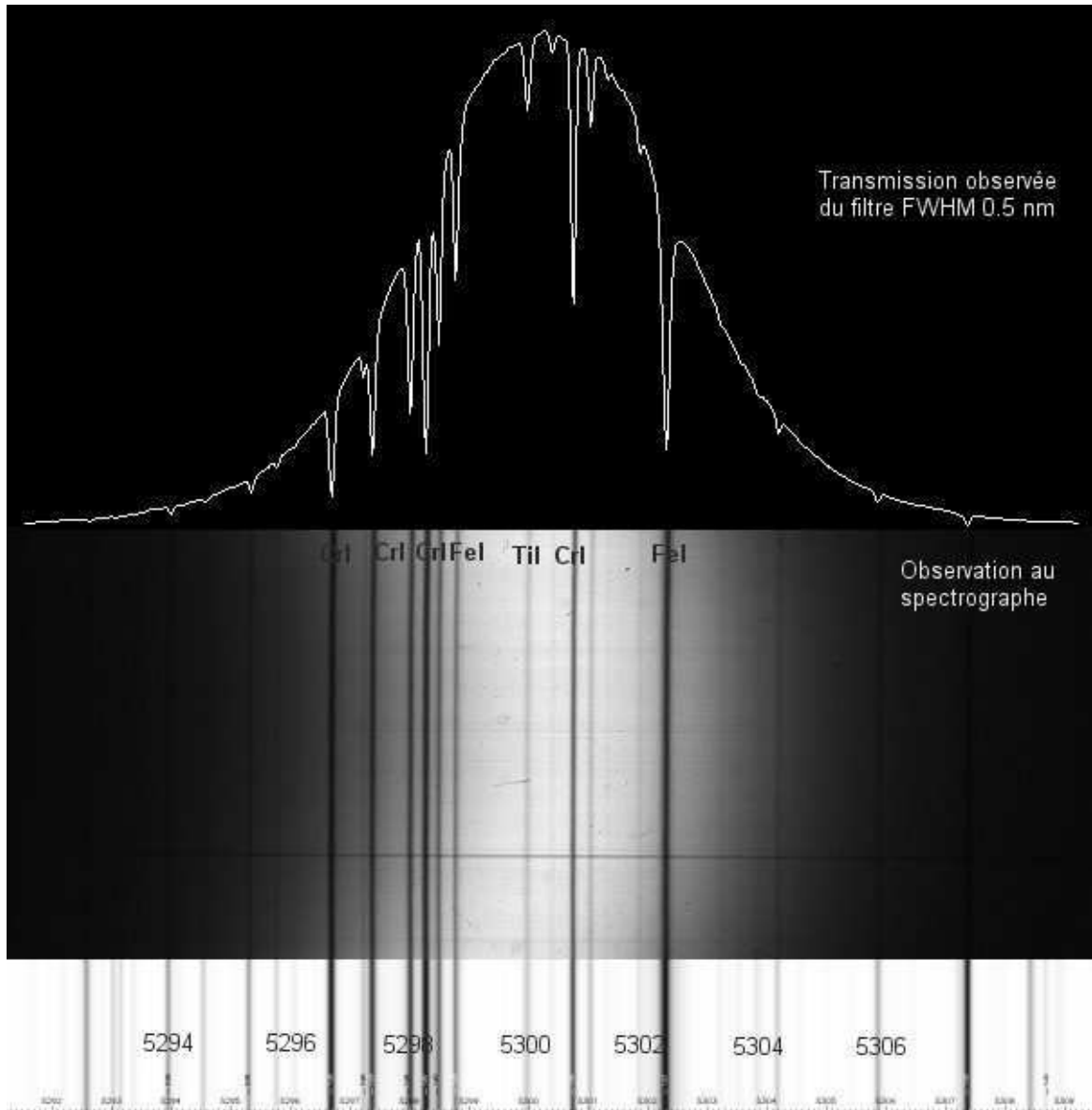
Une densité neutre ND1 carrée 50 x 50 mm est placée devant l'objectif en pleine ouverture et suivie d'un diaphragme de 50 mm de diamètre. Ce diaphragme définit la pupille d'entrée de la lunette. La lunette travaille donc en réalité à  $F/12$  (demi angle du cône de lumière =  $2.4^\circ$ ).

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  $23^\circ\text{C}$ . 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

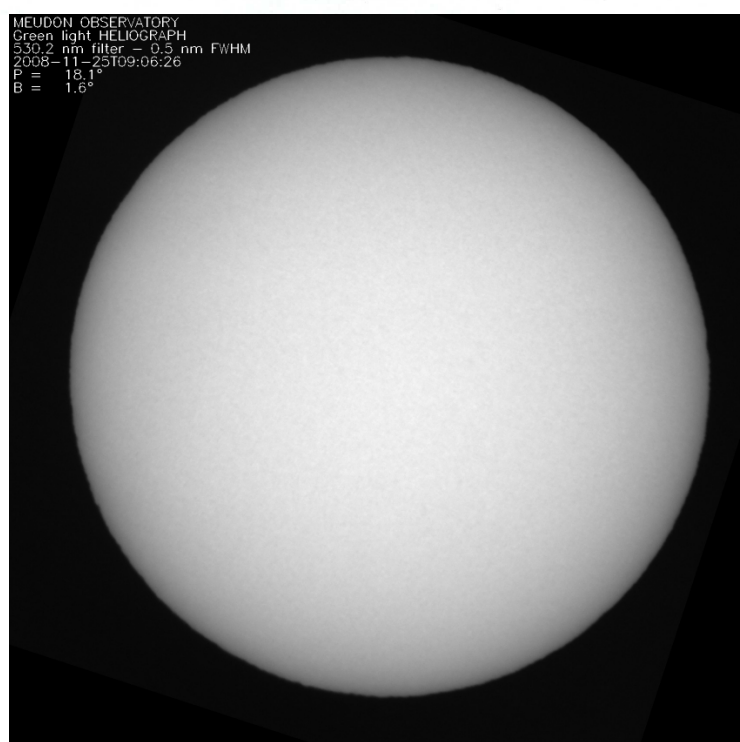
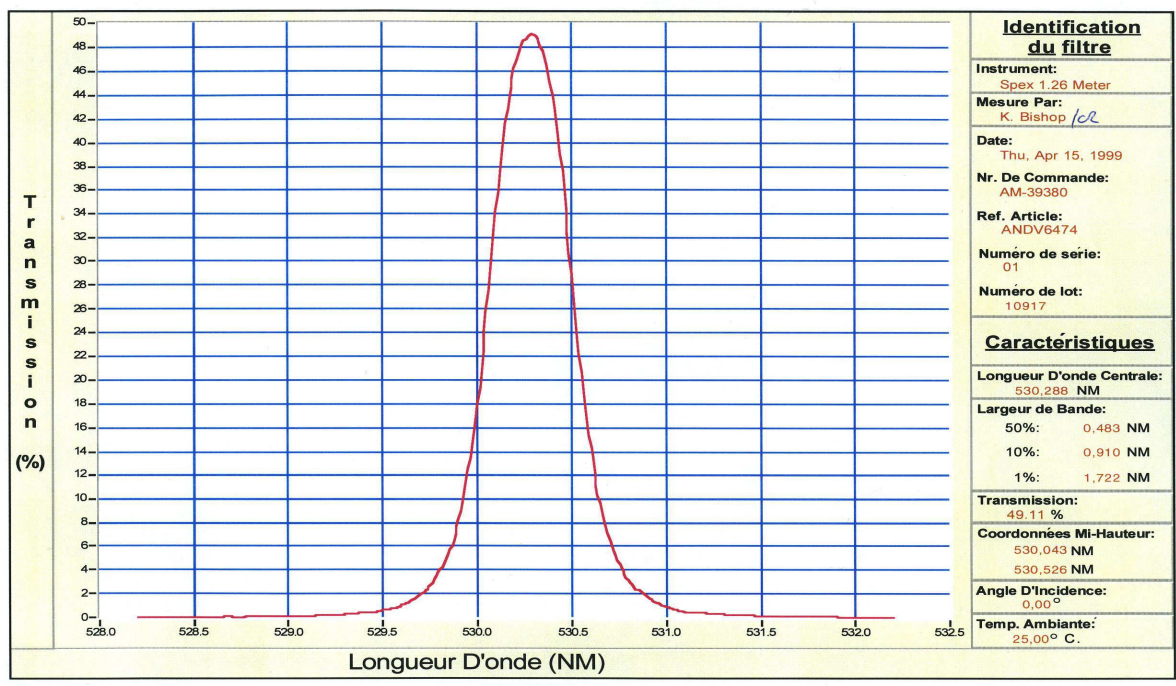
Le soleil mesure en théorie et en moyenne 5.58 mm au foyer de la lunette 2, soit 1594 pixels de 3.5 microns. En hiver (le soleil a un diamètre apparent plus grand en automne/hiver) le calcul théorique donne 5.66 mm soit 1617 pixels. La mesure avec la lunette 1 donne 1470 pixels et avec la lunette 2 donne 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<sup>-</sup>

A mi saturation, on a 10000 e<sup>-</sup> par pixel environ  
 Bruit de lecture 24 e<sup>-</sup>, bruit de photons à mi saturation voisin de 100 e<sup>-</sup>  
 Bruit global =  $(24^2 + 100^2)^{1/2} = 103$  e<sup>-</sup> 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<sup>-</sup> 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.

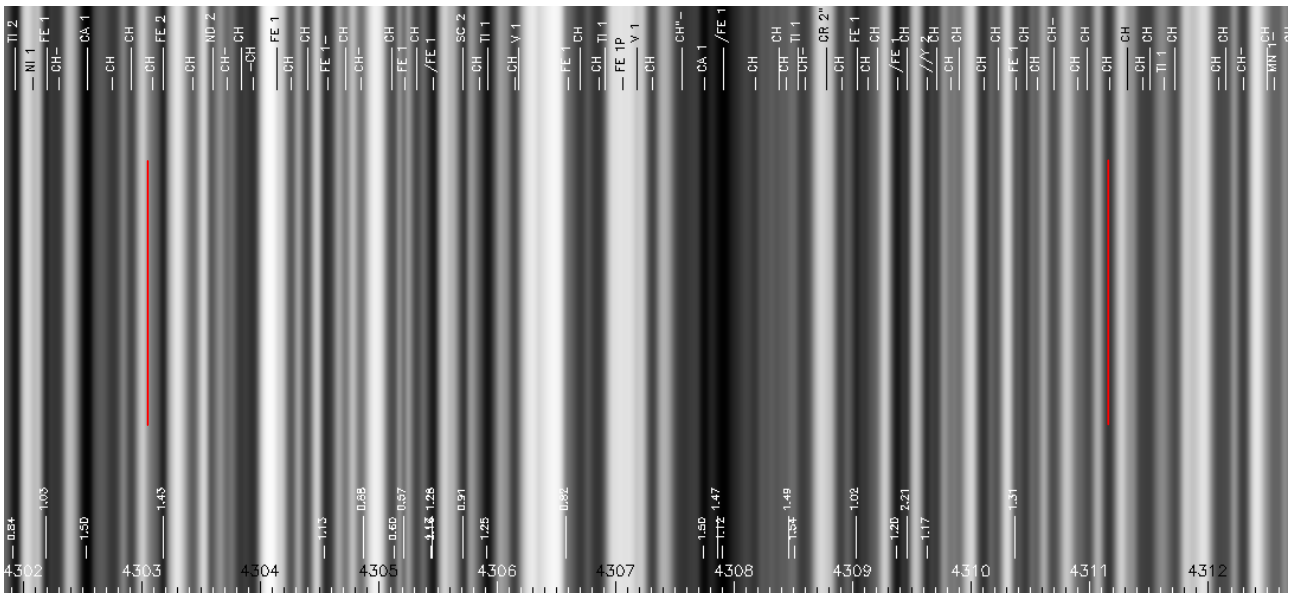
## L.O.T. - Oriel



MEUDON OBSERVATORY  
 Green light HELIOGRAPH  
 530.2 nm filter - 0.5 nm FWHM  
 2008-11-25T09:06:26  
 P = 18.1°  
 B = 1.6°

*Exemple  
d'image  
obtenue  
avec la  
lunette*

## VII - Héliographe de Meudon, lunette Bande G



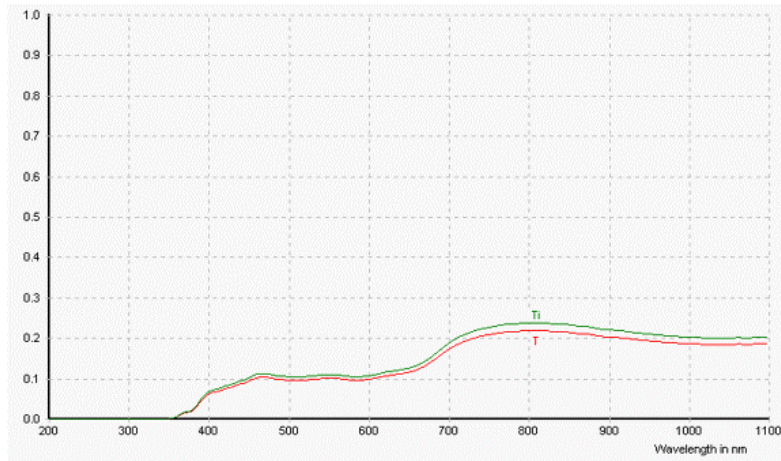
La lunette a pour but de surveiller l'activité solaire au niveau photosphérique dans la bande moléculaire de la molécule CH, baptisée G, autour de 430.7 nm (intégration sur un grand nombre de raies, voir spectre ci dessus, sur une largeur de 8 Å à mi hauteur indiquée par les bornes rouges)

### 1 - Instrument

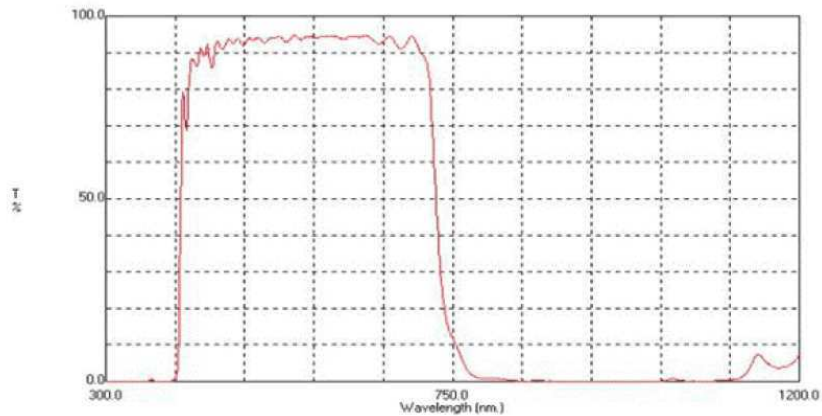
Lunette à deux verres ED (doublet apochromatique) de marque Vixen, modèle ED80SF, D = 80 mm, F = 600 mm. Une densité neutre ND1 carrée 50 x 50 mm est placée devant l'objectif en pleine ouverture et suivie d'un diaphragme de 50 mm de diamètre. Ce diaphragme définit la pupille d'entrée de la lunette. La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

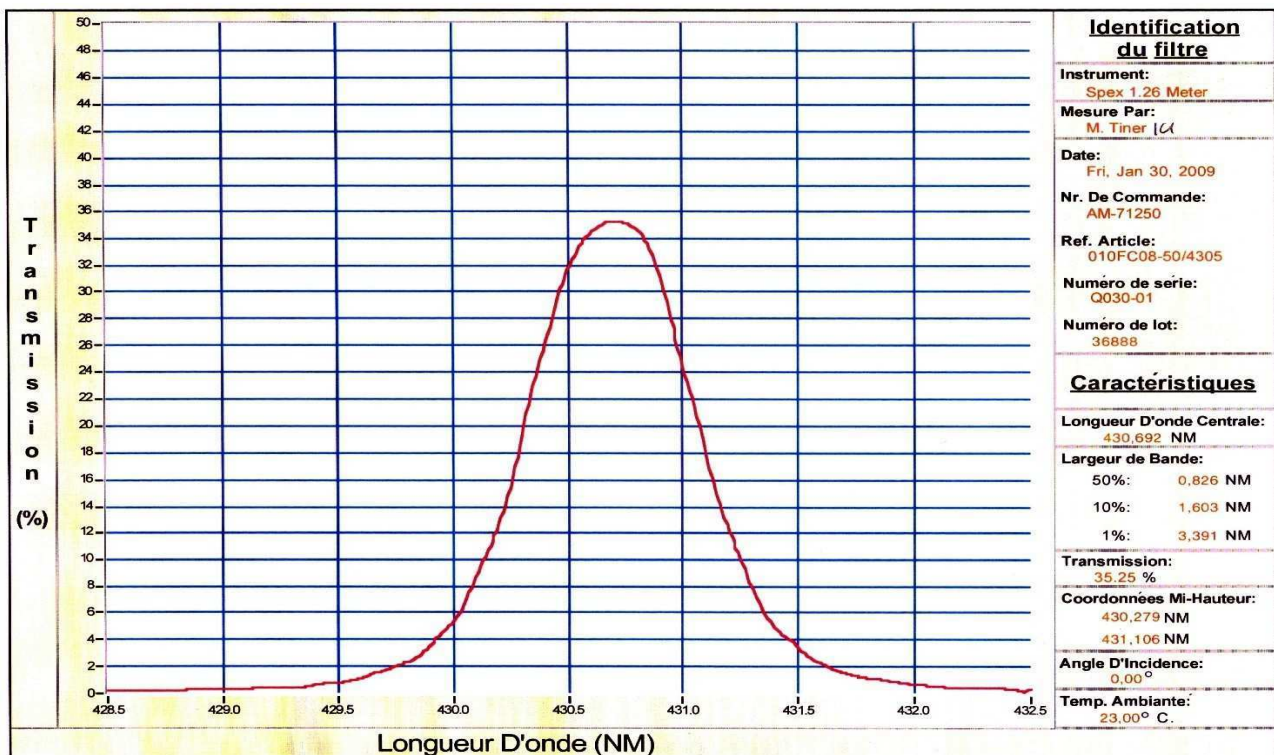
## 2 - Transmission de la densité neutre en pleine ouverture SCHOTT



## 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<sup>-</sup>

A mi saturation, on a 10000 e<sup>-</sup> par pixel environ

Bruit de lecture 24 e<sup>-</sup>, bruit de photons à mi saturation voisin de 100 e<sup>-</sup>

Bruit global =  $(24^2 + 100^2)^{1/2} = 103$  e<sup>-</sup> 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<sup>-</sup> par ADU

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

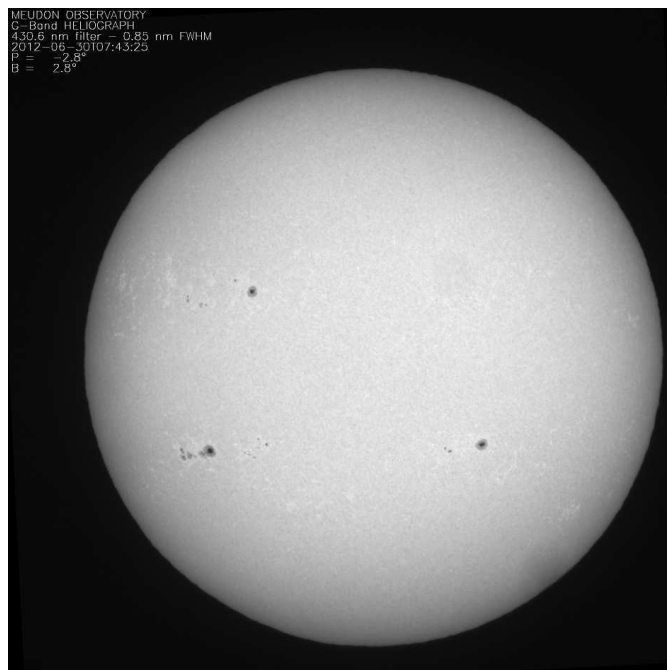
Caméra CMOS de marque Pixelink, modèle PL-B781F, 20 % de rendement quantique à 430 nm

Spécifications et caractéristiques données page 24.

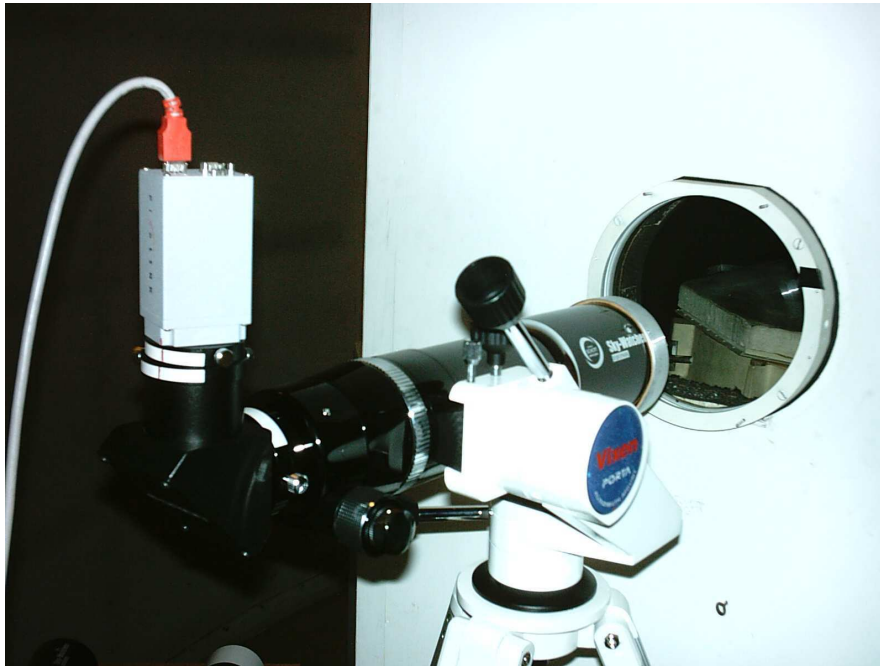
## 8 - Acquisitions et traitement

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

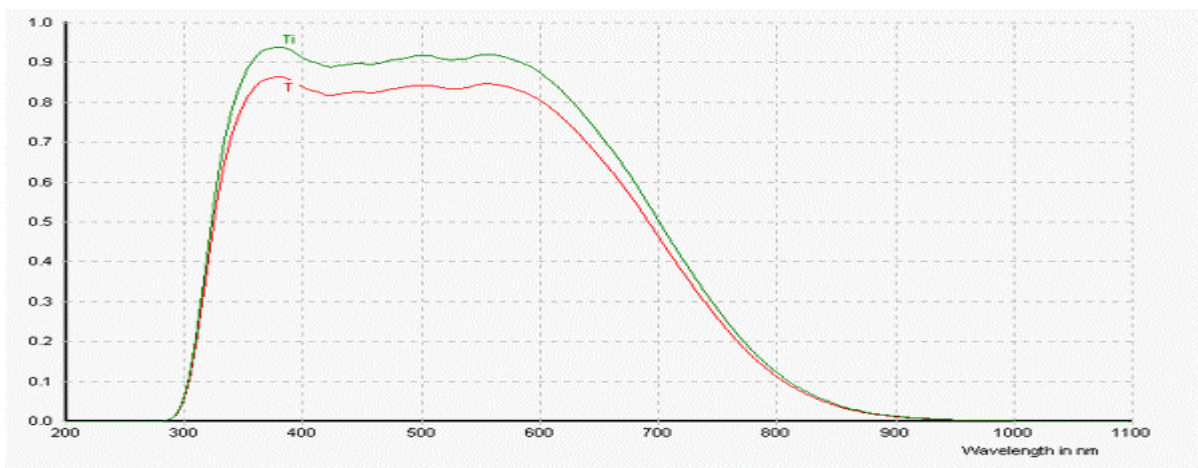


Le but de cette lunette de secours est de surveiller l'activité solaire au niveau chromosphérique dans la raie K du Calcium à 393.37 nm (intégration sur le profil au voisinage du coeur de raie).

### 1 - Instrument

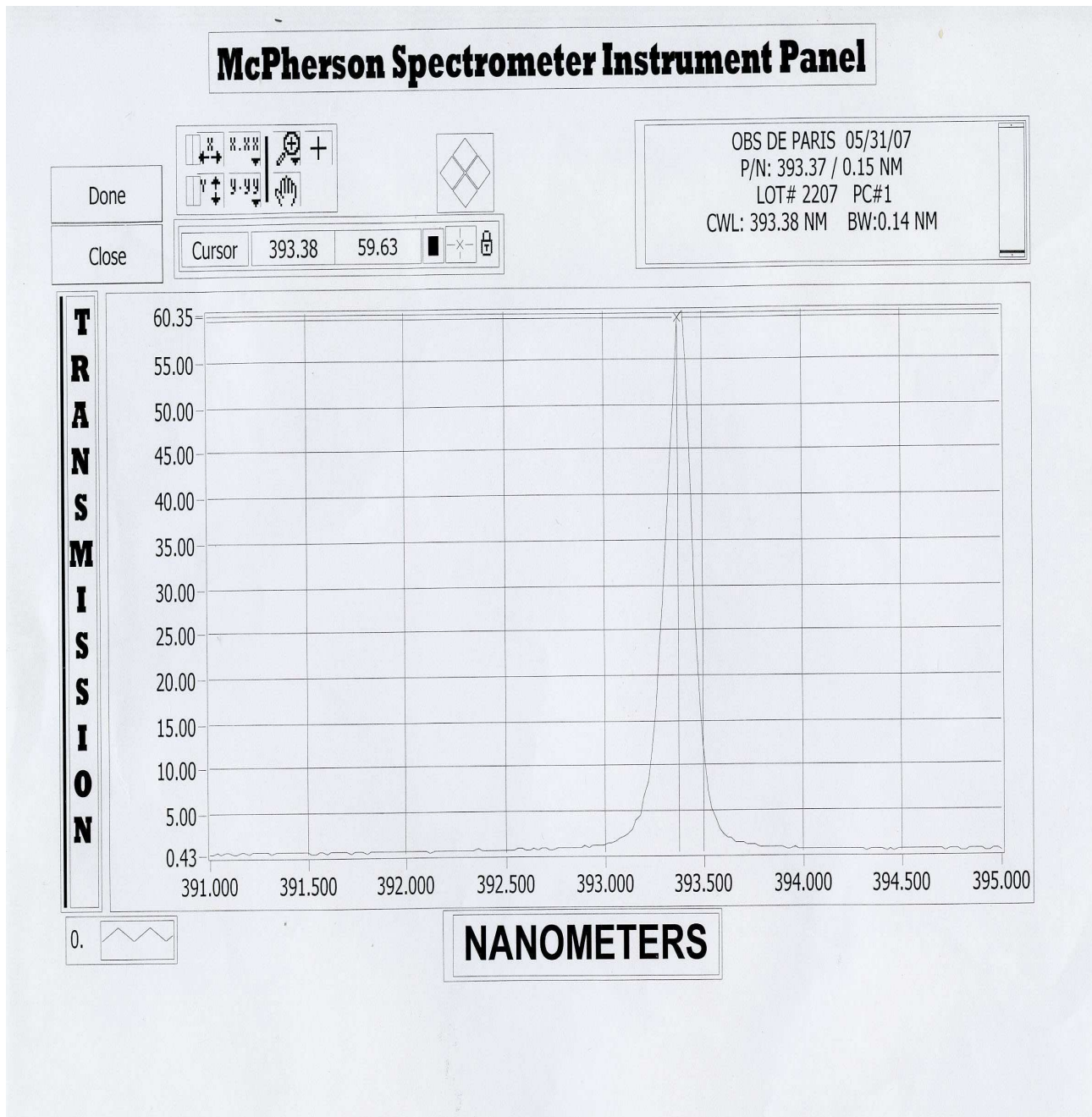
Lunette de marque SkyWatcher, modèle Equinox 80 ED,  $D = 80$  mm,  $F = 500$  mm. Un filtre anti calorique KG3 d'un diamètre de 50 mm placé devant l'objectif définit la pupille de la lunette. Le faisceau est replié par un renvoi coudé à miroir plan puis traverse un filtre Barr Associates centré sur 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  $23^\circ\text{C}$ , 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<sup>-</sup>

A mi saturation, on a 10000 e<sup>-</sup> par pixel environ

Bruit de lecture 24 e<sup>-</sup>, bruit de photons à mi saturation voisin de 100 e<sup>-</sup>

Bruit global =  $(24^2 + 100^2)^{1/2} = 103$  e<sup>-</sup> 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<sup>-</sup> 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

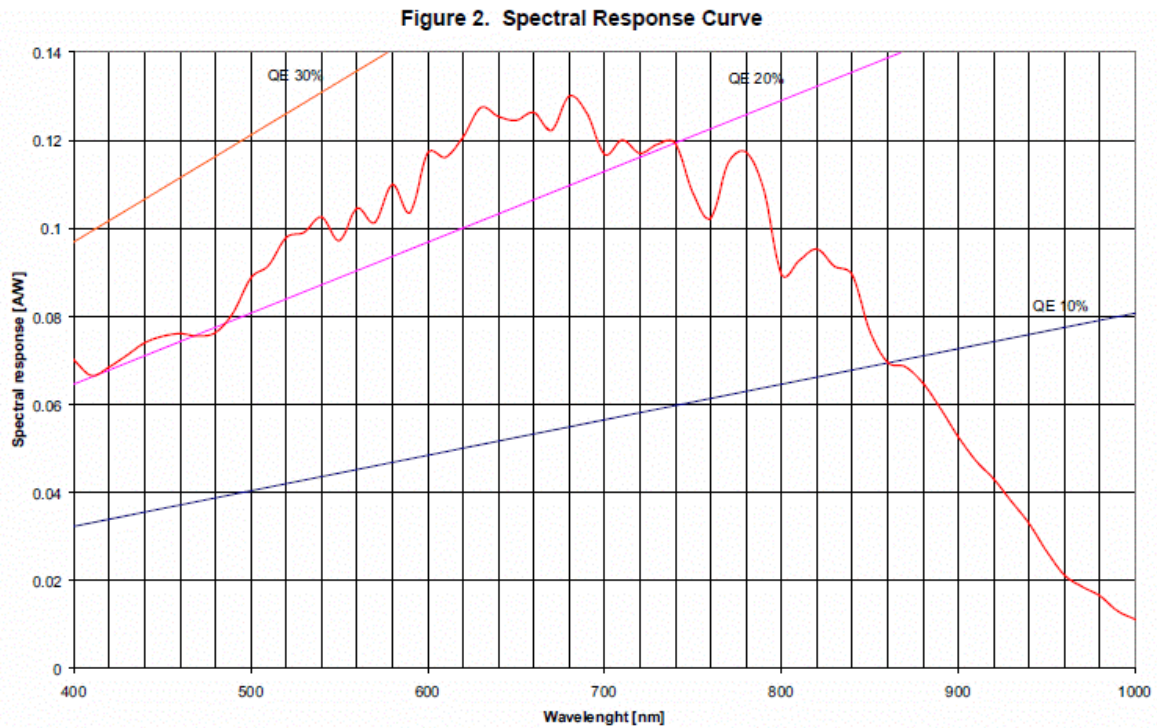
### Electro Optical Specifications

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 <sup>-</sup>	
Sensitivity (peak)	411 V.m <sup>2</sup> /W.s 4.83 V/lux.s	At 650 nm (85 lux = 1 W/m <sup>2</sup> )
Sensitivity (visible)	328 V.m <sup>2</sup> /W.s 2.01 V/lux.s	400-700 nm (163 lux = 1 W/m <sup>2</sup> )
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 <a href="#">Spectral Response Curve</a> on page 3.
Fill Factor	35%	Light sensitive part of pixel (measured)
Dark Current	3.37 mV/s 78 e <sup>-</sup> /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 <sup>-</sup> /s	Dark current RMS value (at 21°C)
Temporal Noise	24 RMS e <sup>-</sup>	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)

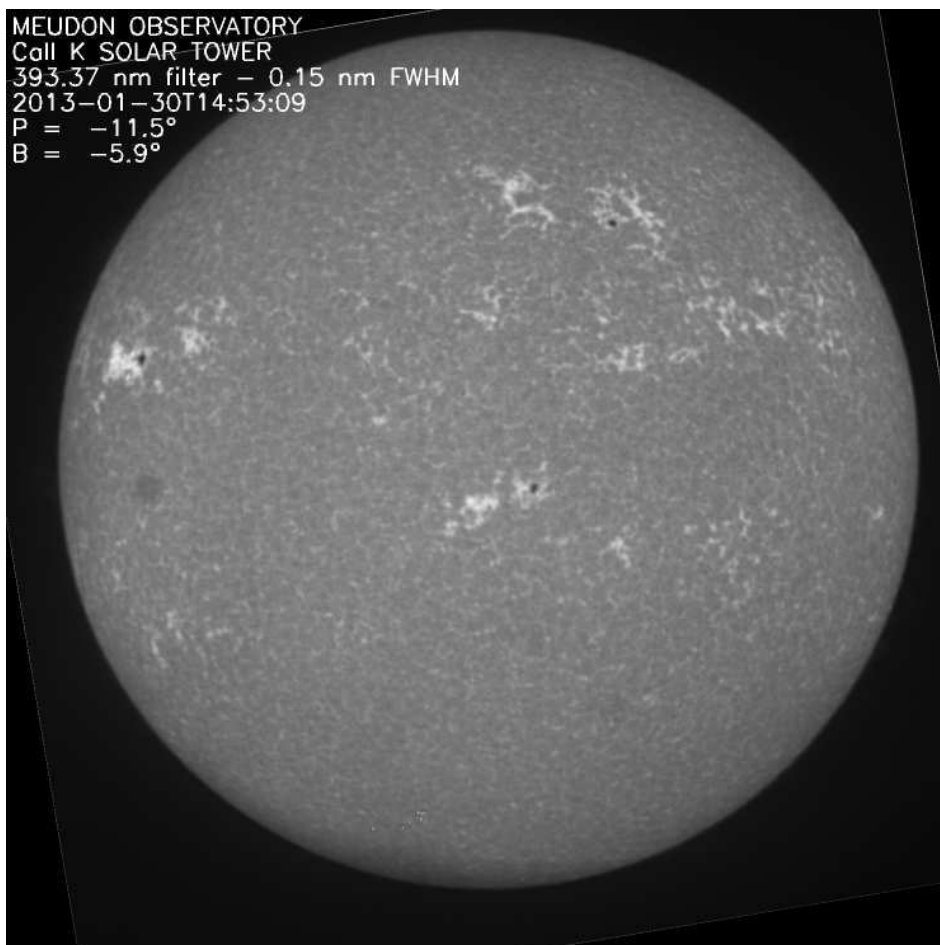
## 7 - Acquisitions et traitement

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.

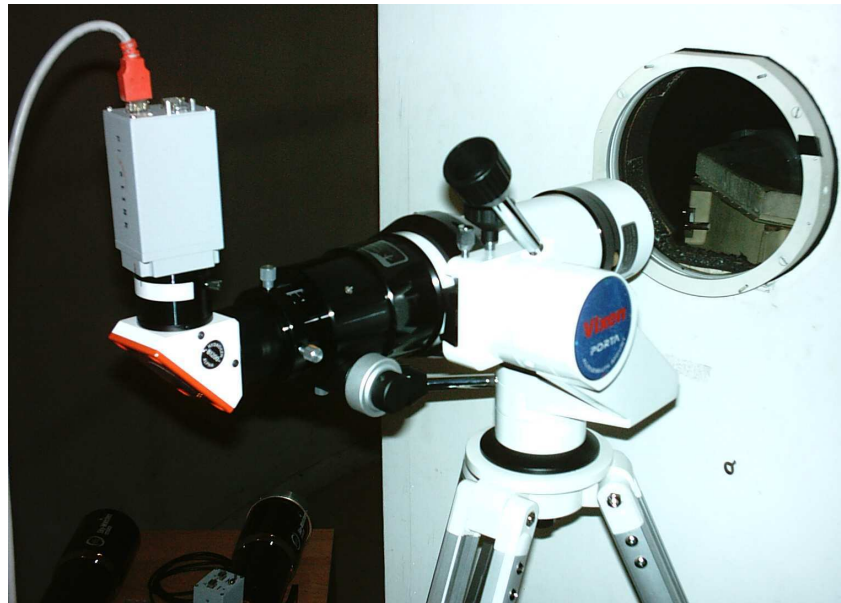


*20% de rendement quantique à 393 nm dans le violet à 400 nm et exemple d'image*



*exemple  
d'image  
obtenue  
avec la  
lunette*

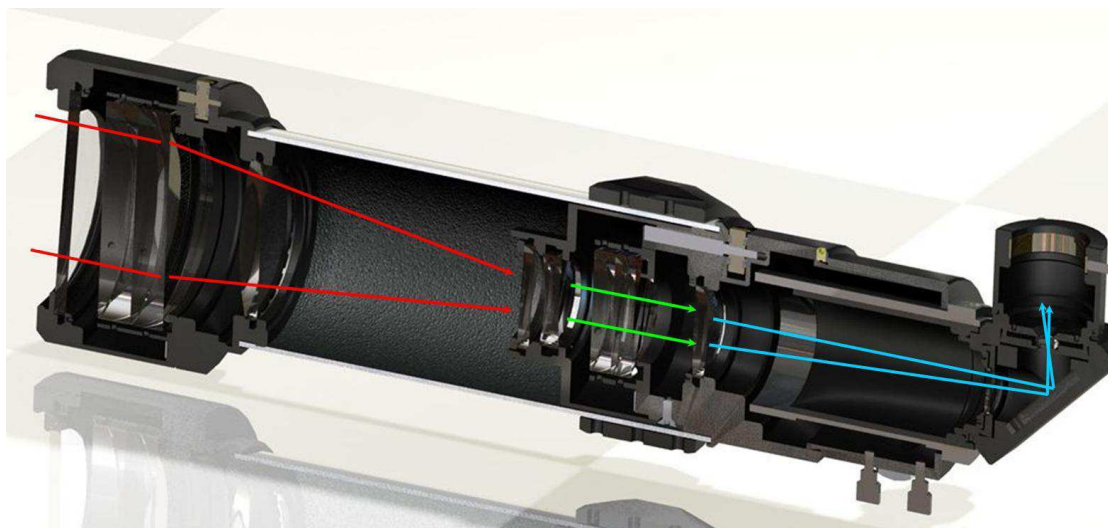
## IX - Tour Solaire de Meudon, lunette H $\alpha$ de secours



L'objet de cette lunette est la surveillance de l'activité solaire au niveau chromosphérique dans la raie H $\alpha$  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 $\alpha$ . 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 cœlostate 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<sup>-</sup>

A mi saturation, on a 10000 e<sup>-</sup> par pixel environ

Bruit de lecture 24 e<sup>-</sup>, bruit de photons voisin de 100 e<sup>-</sup>

Dynamique 21500/24 = 900 (10 bits)

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

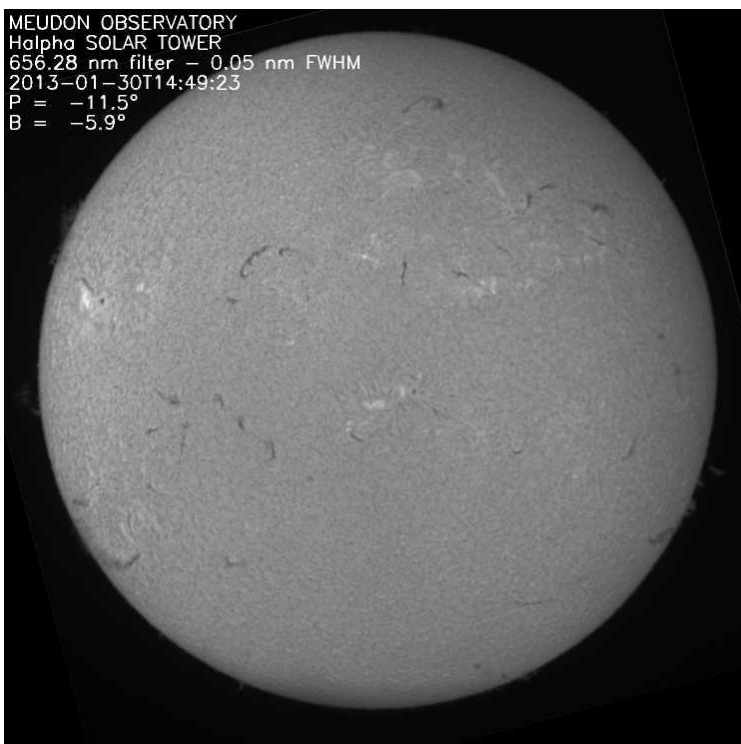
Caméra CMOS de marque Pixelink, modèle PL-B781F

25% de rendement quantique à 650 nm dans le rouge

Spécifications en pages précédentes 40 et 41.

## 5 - Acquisition et traitement

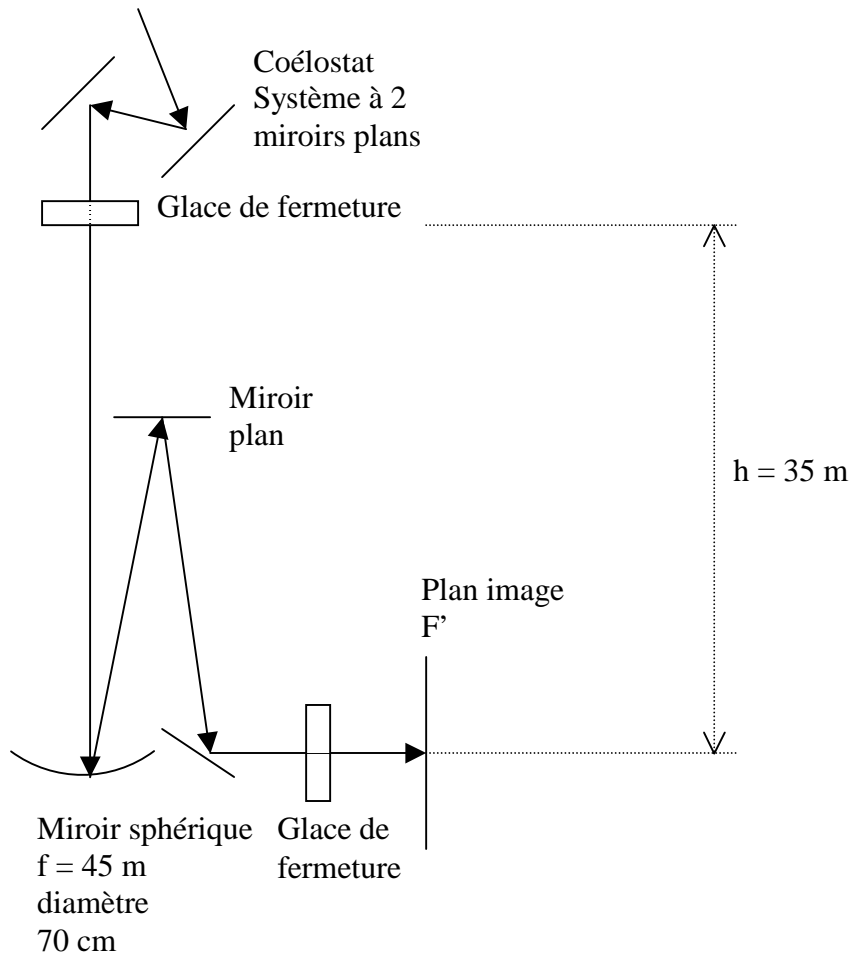
Les acquisitions sont faites à partir d'un ordinateur de type PC sous Windows XP par un logiciel développé en visual basic V6. On peut observer sous forme de rafales de 100 images acquises en RAW. La série d'images est ensuite traitée par le logiciel : « Registax » qui génère une image FITS, résultat 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 - 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 :  $D = 60$  cm.



*Les miroirs du coélostats en haut de la Tour captent la lumière du soleil*



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

le diamètre angulaire  $\alpha$  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  $1000 \text{ W/m}^2$ , 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  $P = 282$  W. Cette puissance se répartit dans l'image de 42 cm de diamètre, soit sur une surface de  $1385 \text{ cm}^2$ . 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  $1000 \text{ W/m}^2$ .

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  $\lambda$ ,  $D$  diamètre du télescope.  $\theta$  est le diamètre angulaire de la tache de diffraction d'une ouverture circulaire de diamètre  $D$ . On trouve numériquement avec  $\lambda = 500$  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.

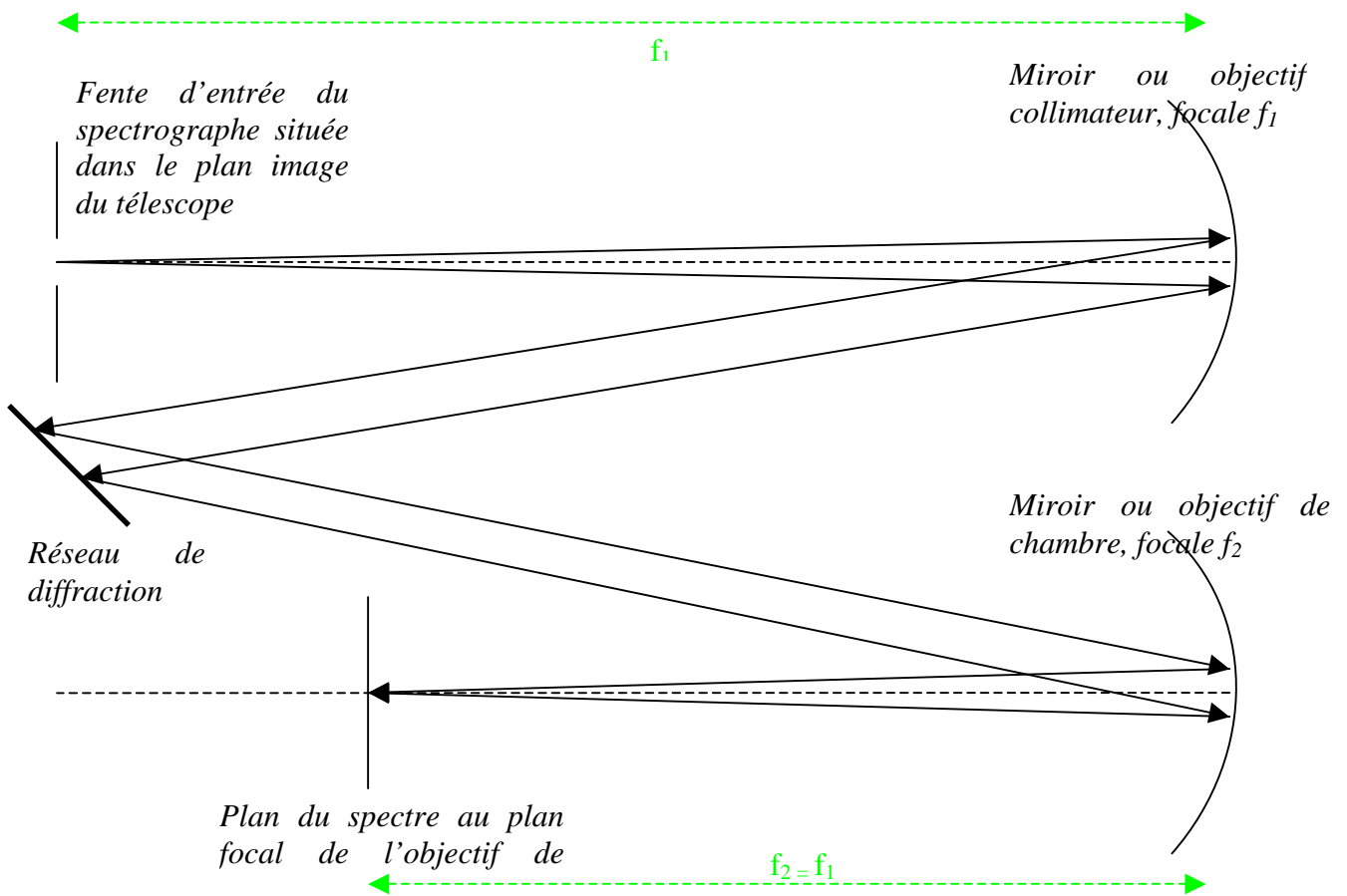
## 2 - le spectrographe en simple passage : caractéristiques

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  $13 \times 25$  cm environ; la sélection des ordres est faite par des filtres interférentiels de 100 Å de bande passante.

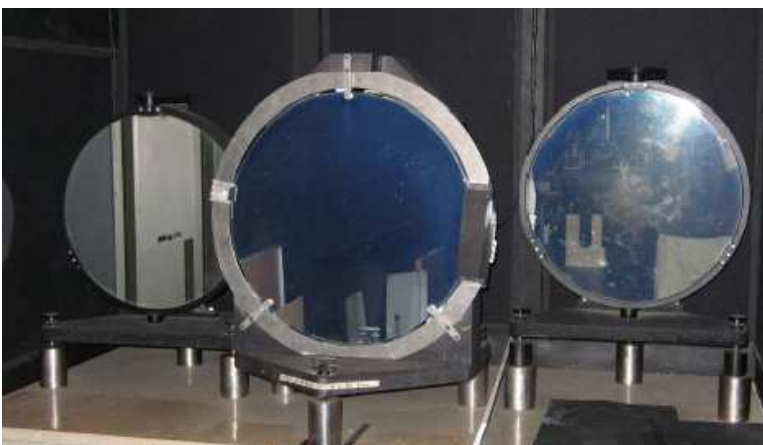
1) *image de la pupille d'entrée du télescope par le collimateur*

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  $\alpha$  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  $\lambda$  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  $\Delta x$  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 ( $\lambda = 4586 \text{ \AA}$ )

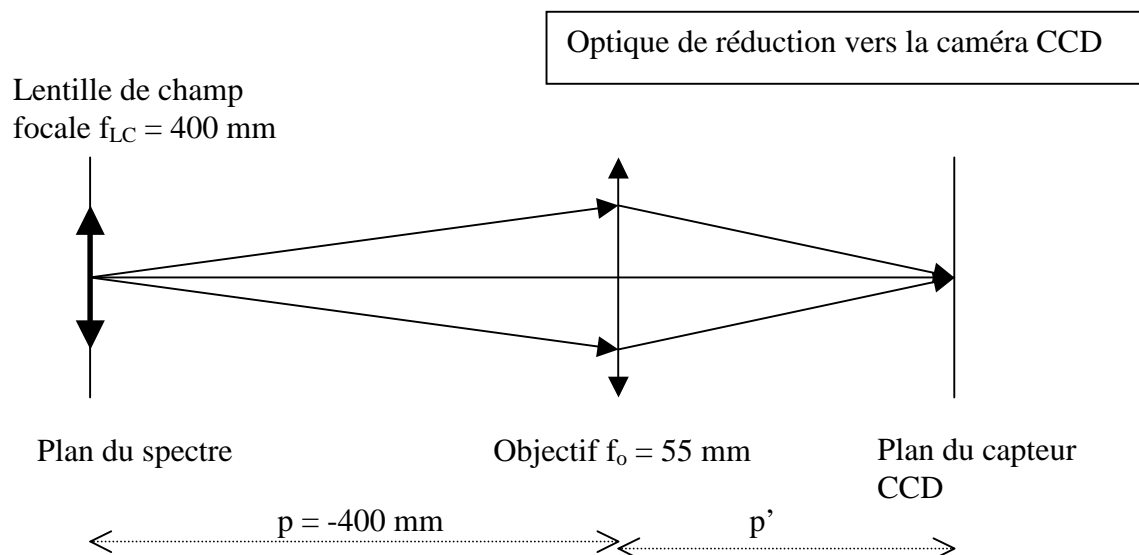
$k = 9$  donne  $\Delta\lambda = 26 \text{ m\AA}$  dans le rouge ( $\lambda = 6625 \text{ \AA}$ )

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  $\alpha$  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 ( $\approx 450$  nm) et dans le rouge ( $\approx 650$  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 =  $12.9$  μ =  $6.6$  mÅ dans le bleu ( $k = 13$ )

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

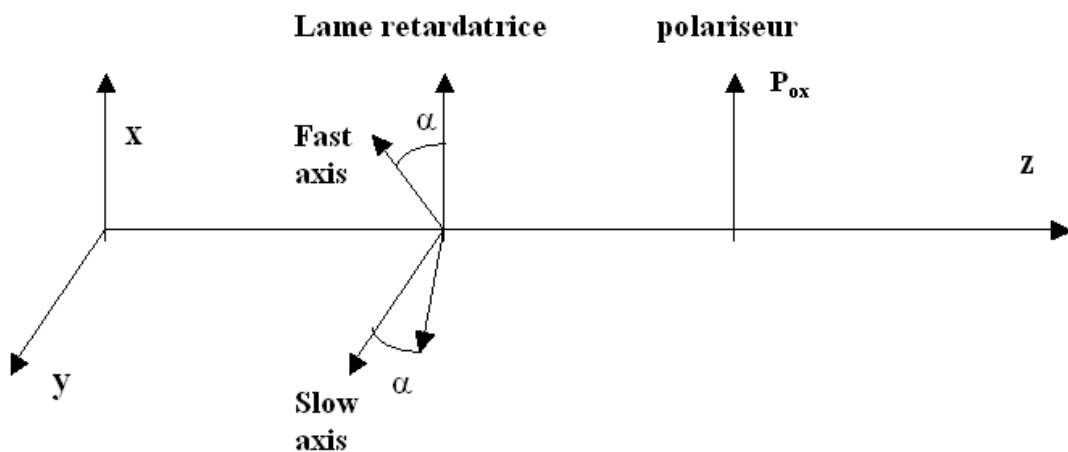
Le pixel spatial se calcule sachant qu'une seconde d'arc représente  $217$  μ x  $0.16 = 34.5$  μ après la réduction de facteur 0.16. Du coup, 1 pixel =  $12.9$  μ =  $12.9/34.5'' = 0.37''$  environ

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  $2 \times 6.6$  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

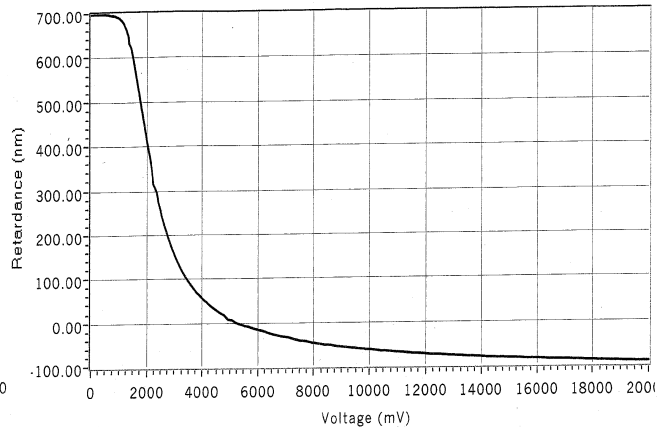
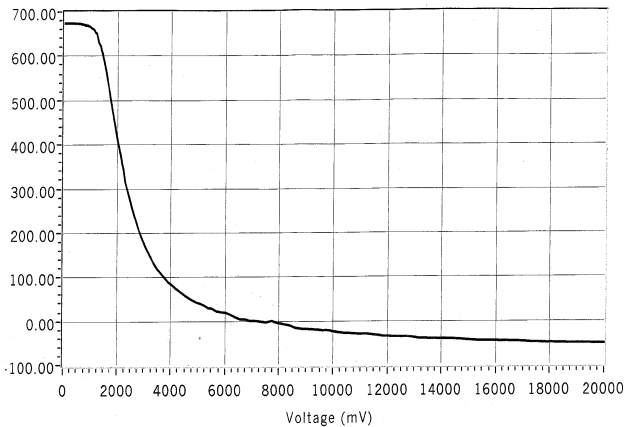
C'est un dispositif optique constitué d'un polariseur et d'une lame retardatrice à retard variable  $\delta$  telle que  $\alpha = \pi/4$  (azimut fixe) et  $\delta$  variant entre 0 et  $2\pi$  par action d'une tension dont l'amplitude peut varier.



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  $\delta$  permettant de déduire par combinaison linéaire  $I_{in}$ ,  $Q_{in}$  et  $V_{in}$  des mesures

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

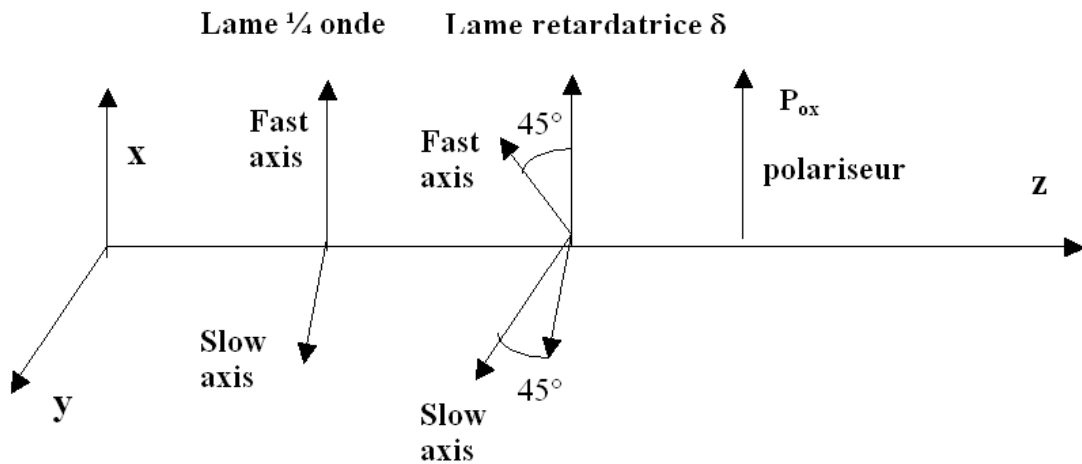
Il est aisé de déduire de ces signaux  $I_{in}$ ,  $Q_{in}$  et  $V_{in}$  :

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

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

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

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  $\delta$  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  $\delta$  permettant de déduire par combinaison linéaire  $I_{in}$ ,  $Q_{in}$  et  $U_{in}$  des mesures.

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

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

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

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

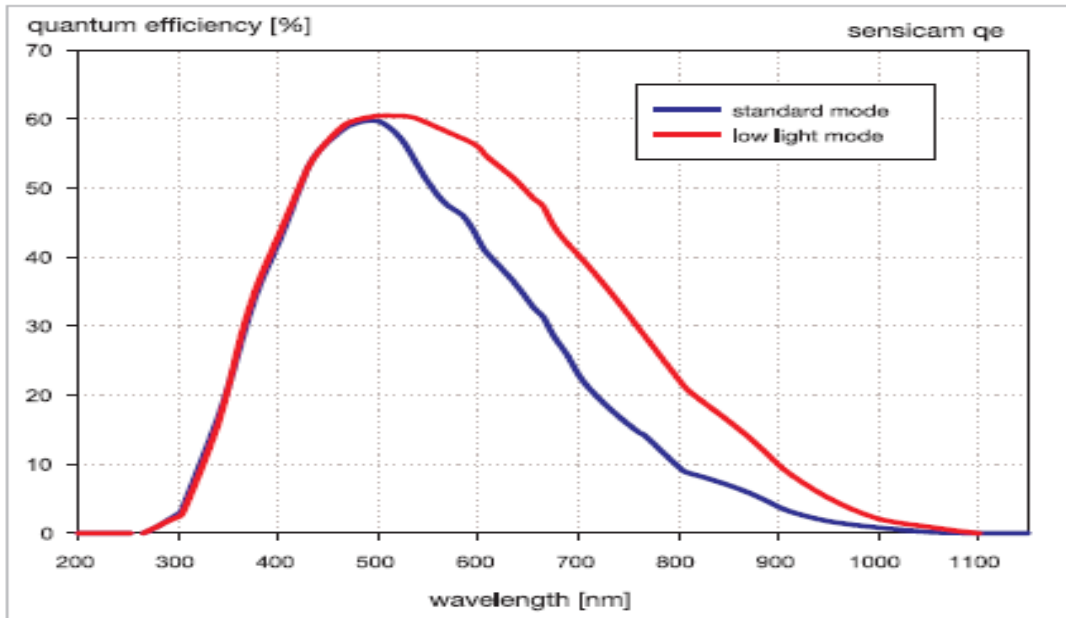
$$U_{in} = I_3 - I_4$$

## 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<sup>-</sup> 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)

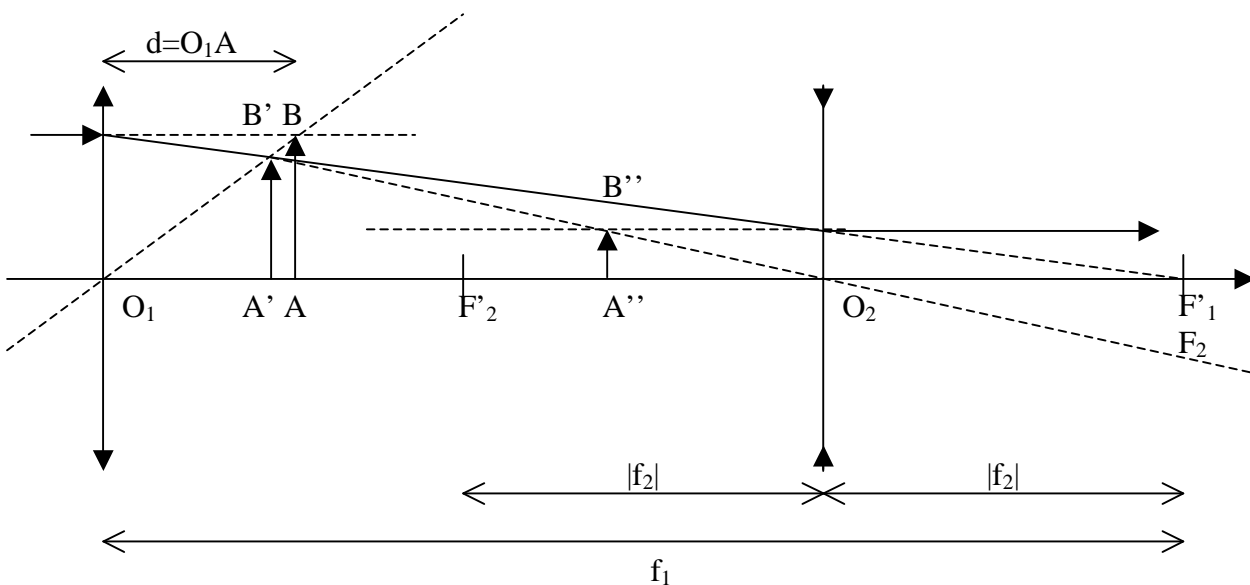
thermoelectrical cooling (Peltier) down to  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 high resolution  $1376 \times 1040$  pixel  
 electronic shutter / exposure times from  $500\text{ ns}$  -  $3600\text{ s}$   
 binning (horizontal & vertical), 1, 2, 4, 8  
 region of interest (ROI)  
 10 frames per second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

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

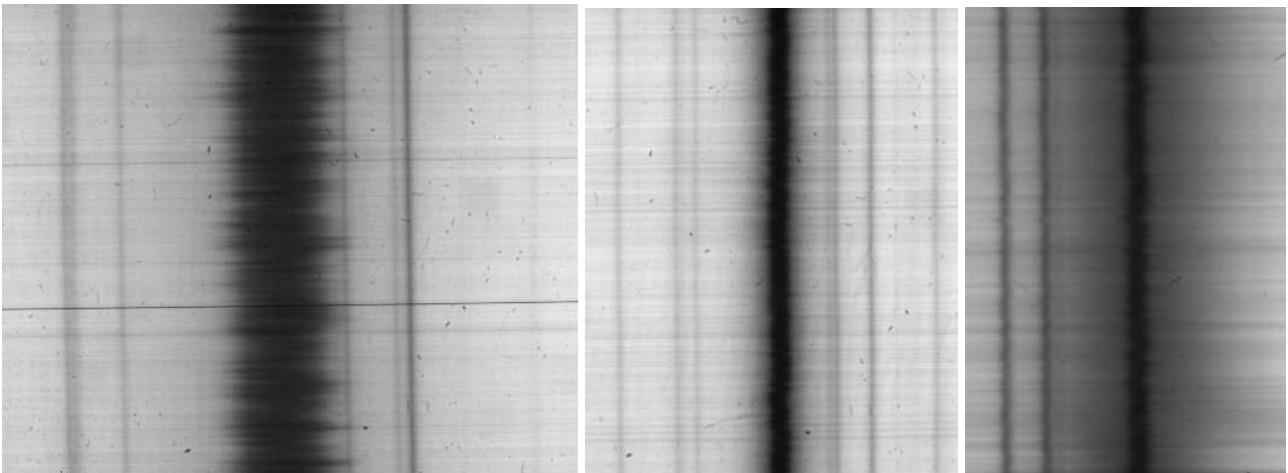
Alors,  $O_1A' = f_1 (1 - \gamma) / 2 = (1+\gamma)/2 O_1A = 1.62$  m

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

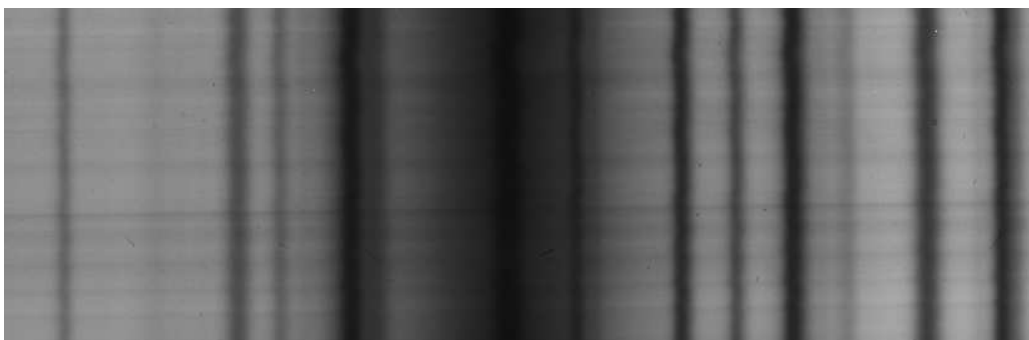
3) quel est le grandissement de la seconde lentille ?

grandissement de la lentille divergente dans ces conditions :

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



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



# XI - 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.

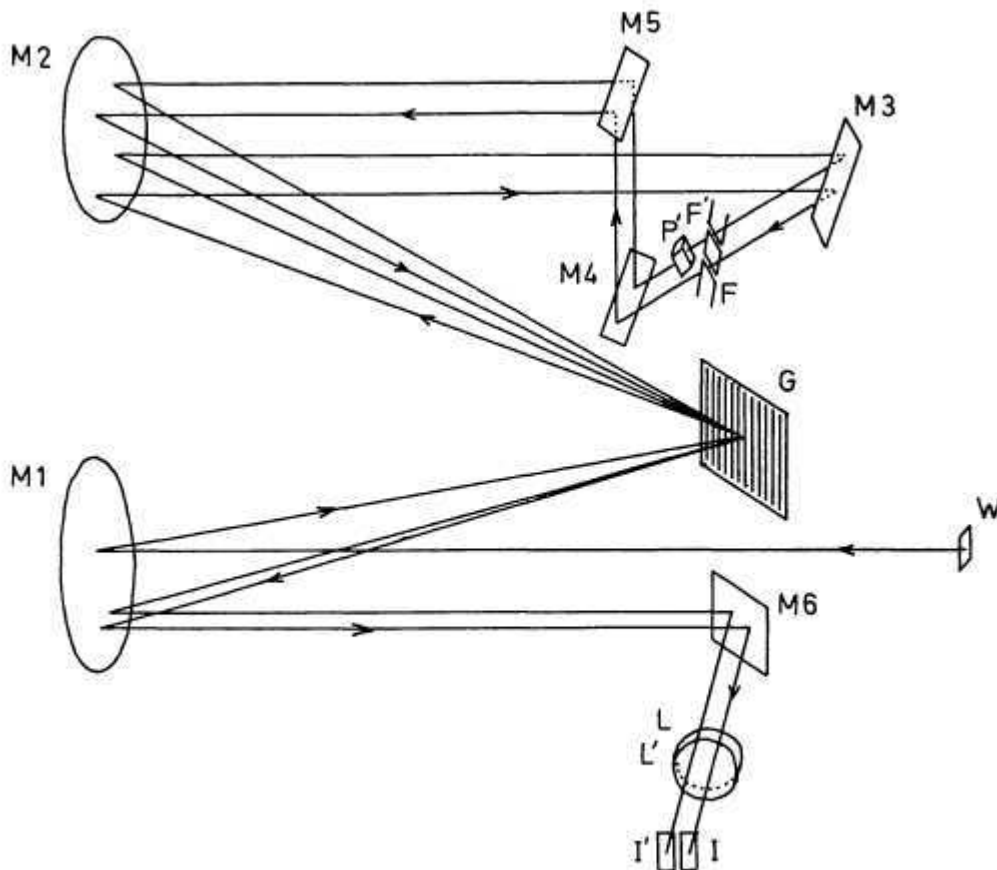


Fig. 1. Diagram of the subtractive double pass spectrograph.

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
- $\epsilon$  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

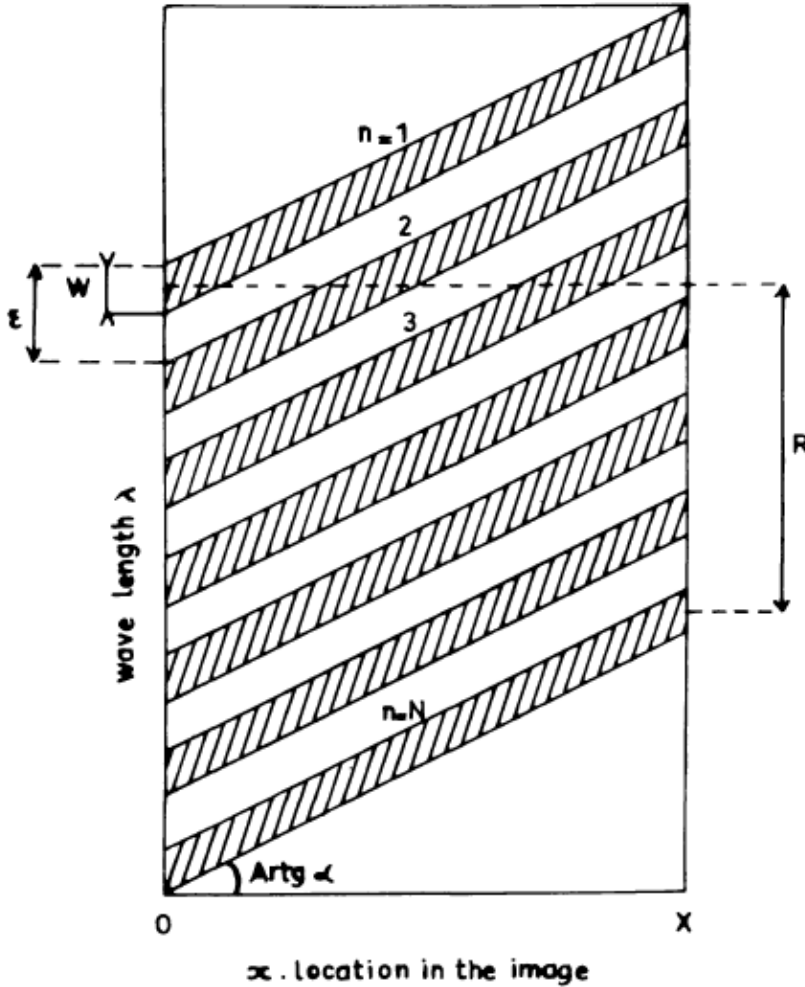
La longueur d'onde varie d'un bord à l'autre du canal selon la loi:

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

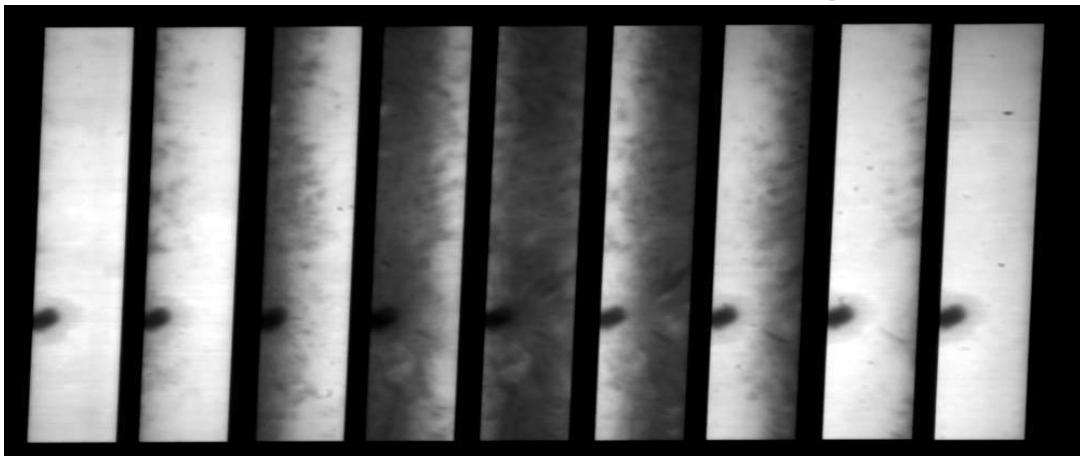
In the whole field ( $0 < x < X, 0 < y < Y$ ), the spectrum is obtained with the wavelength resolution  $\varepsilon$  in the minimum range  $R$  defined by

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

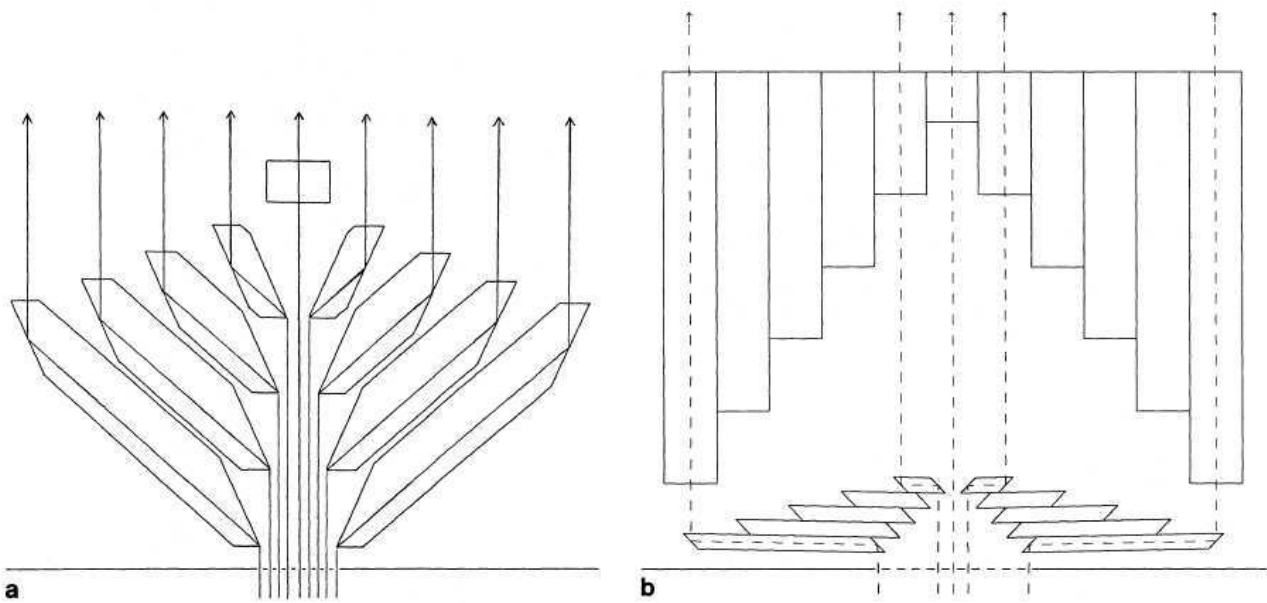
In the Meudon spectrograph  $X = 8 \text{ mm}$ ,  $1/\alpha = 8.3 \text{ mm}/\text{\AA}$ ,  $\varepsilon = 0.36 \text{ \AA}$ ,  $w = 0.18 \text{ \AA}$  and  $R = 1.2 \text{ \AA}$  for the  $H\alpha$  line.



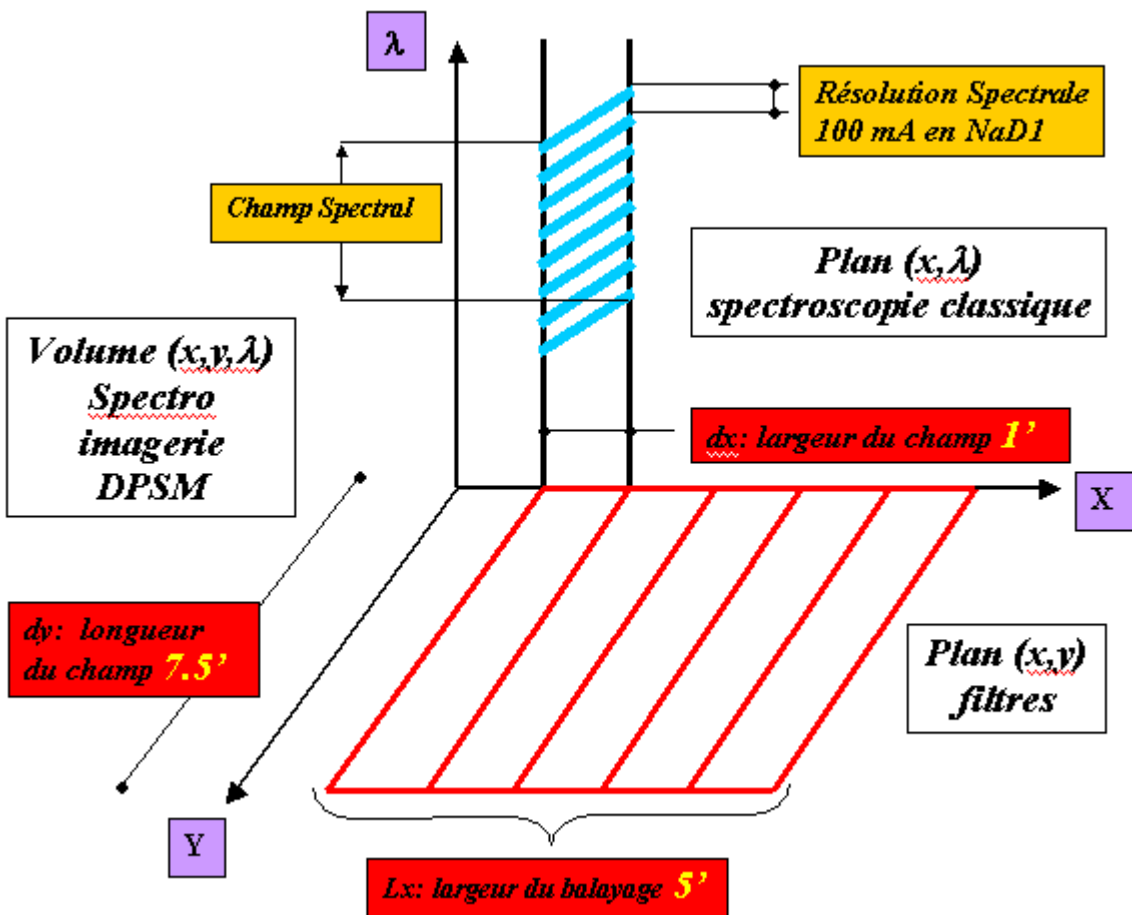
Wavelength versus the  $x$ -coordinate on the Sun for the  $N$  channels of the MSDP. Hatched areas show the photons which are recorded simultaneously.



*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' x 8' avec réducteur focal (pixel de 0.5") ou de 30" x 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' x 8'



**BOÎTES 9  
CANAUX**

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

**BOÎTES 11  
CANAUX**

1200 $\mu$	800 $\mu$	F / 60	7.5 mm	Pic du midi
600 $\mu$	300 $\mu$	F / 60	7.5 mm	Pic du midi
600 $\mu$	300 $\mu$	F / 60	7.5 mm	VTT

**BOÎTE 14  
CANAUX**

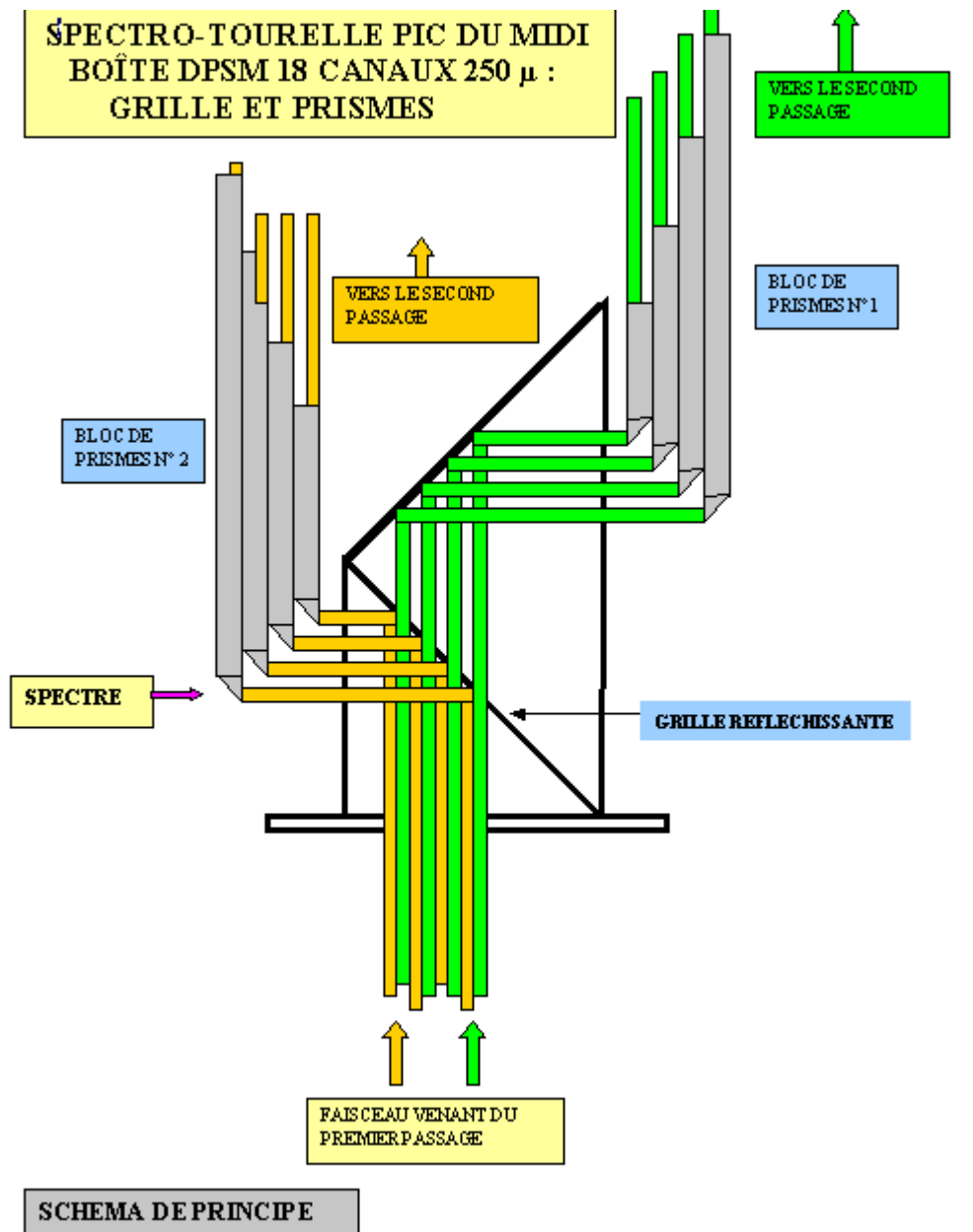
250 $\mu$	100 $\mu$	F / 60	3 mm	Themis terminée mais jamais mise en service
-----------	-----------	--------	------	---

**BOÎTES 16  
CANAUX**

400 $\mu$	200 $\mu$	F / 60	3.3 mm	Themis
400 $\mu$	200 $\mu$	F / 60	3.3 mm	Themis

**BOÎTES 18  
CANAUX**

600 $\mu$	600 $\mu$	F / 60	3.6 mm	Themis : jamais financée
250 $\mu$	250 $\mu$	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

Obturateur 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

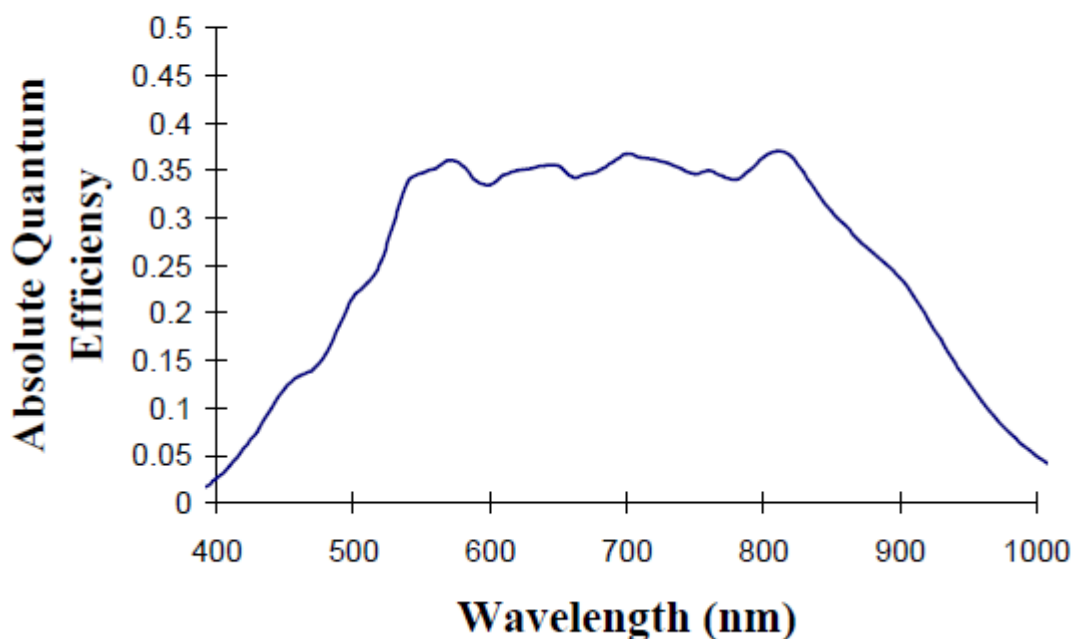
Langage de programmation: V-Pascal

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



## XII - 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

Filtre interférentiel 100 Å devant l'objectif

Pixel voisin de 0.2 arc sec

Champ de l'ordre de 1' x 1'

### 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

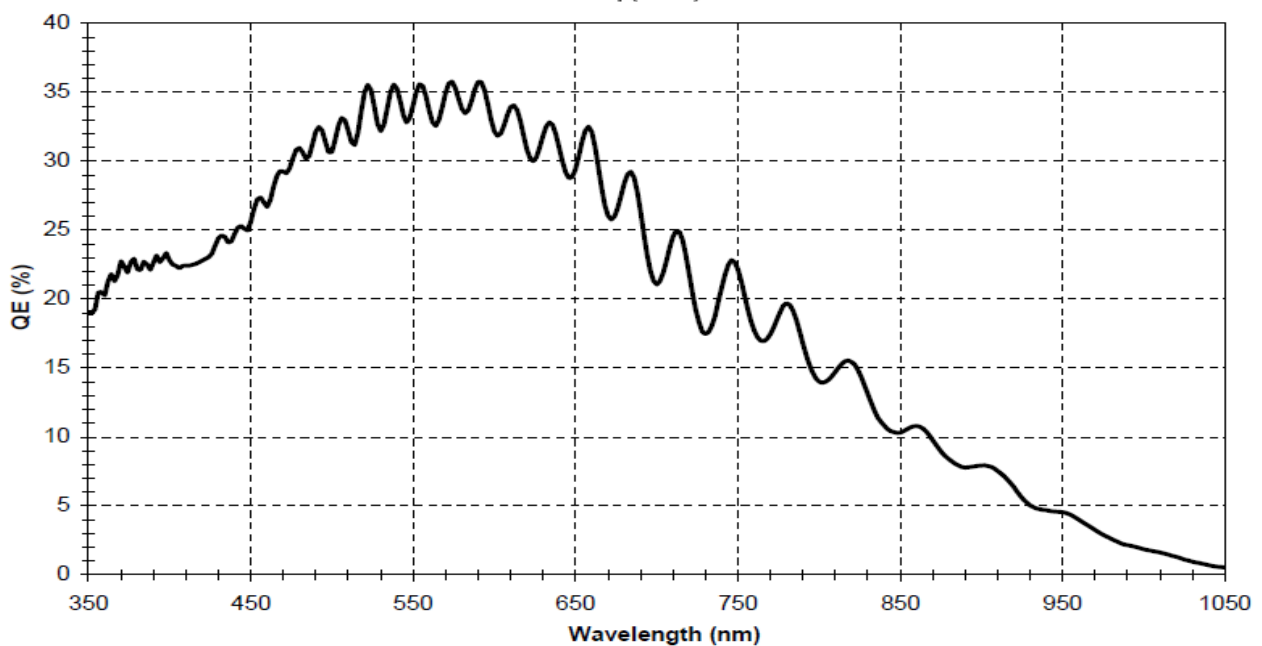
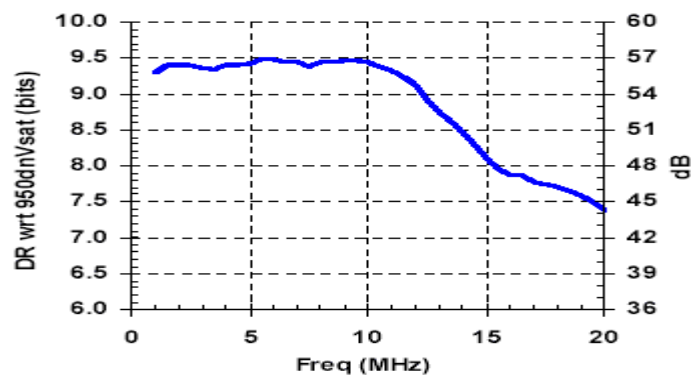
bruit de lecture permanent à 70 e, soit 2 coups

bruit total voisin de 156 e

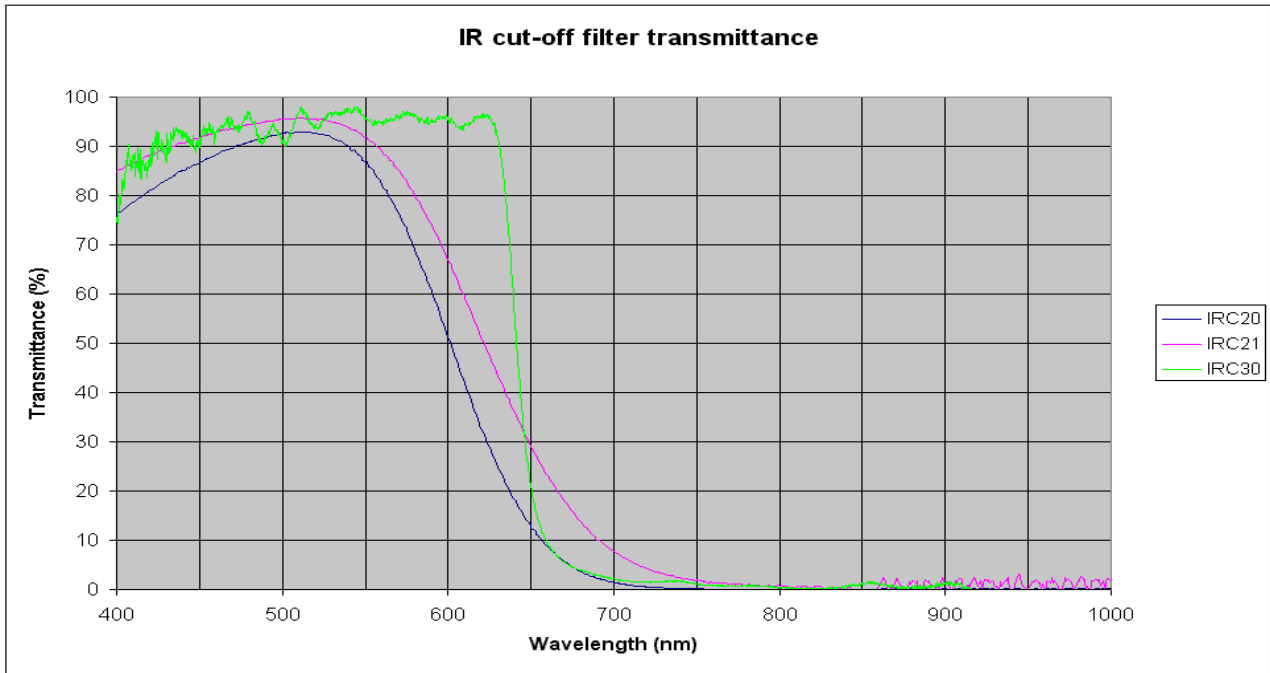
Dynamique  $40000/70 = 570$  (10 bits)

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*

### 3 - Logiciel de pilotage

Caractéristiques principales de la caméra :

Pixels de 6  $\mu$ , 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 (N images enregistrées) :*

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

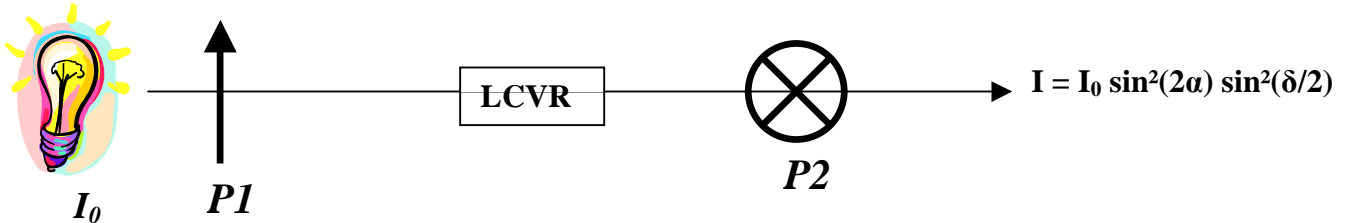
Close,10

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

### 1 – Alignement des axes

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

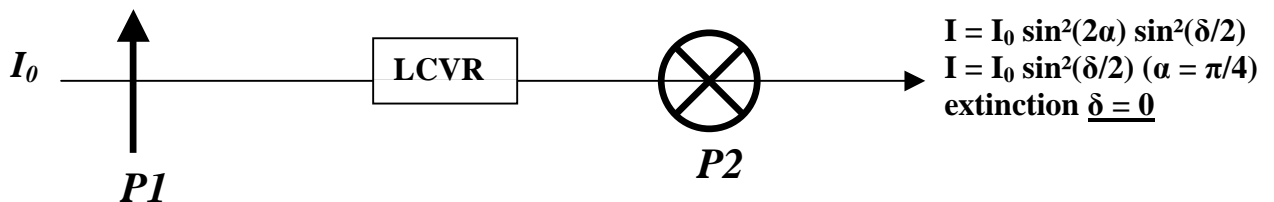
Eviter  $\delta = 0$  et  $2\pi$  ; extinction, donc parallélisme des axes avec P1/P2, pour  $\alpha = 0$  modulo  $\pi/2$



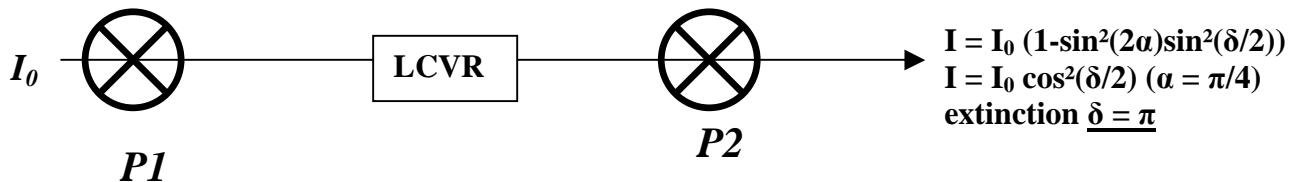
Tourner le LCVR de  $\pi/4$  après avoir trouvé ses axes selon cette méthode

### 2 – calibration 0 et demi onde

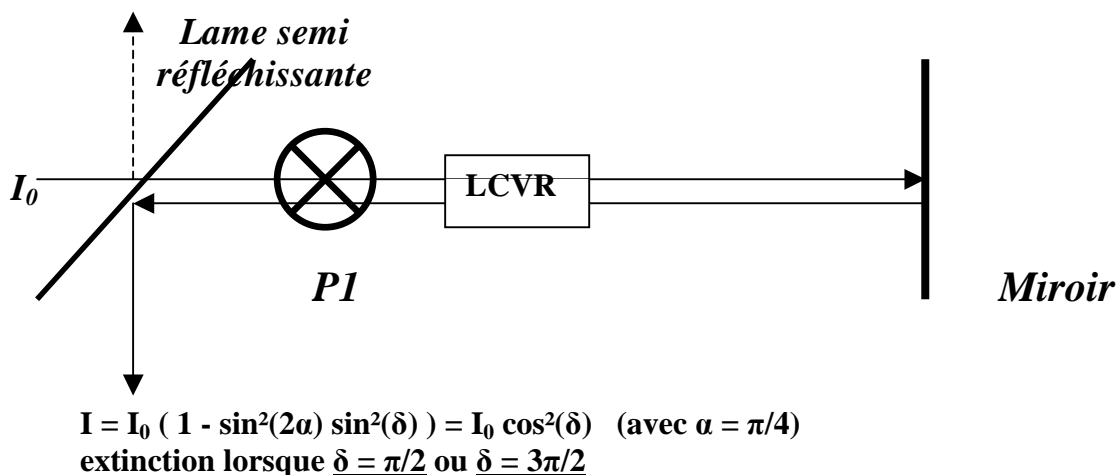
0 onde



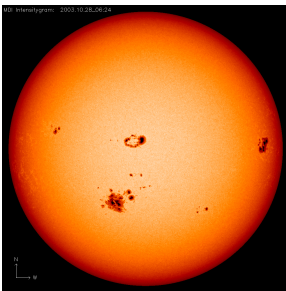
demi onde



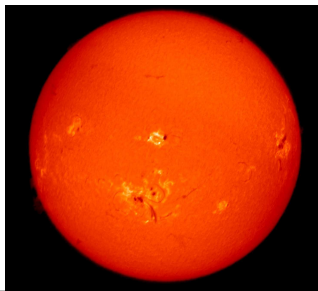
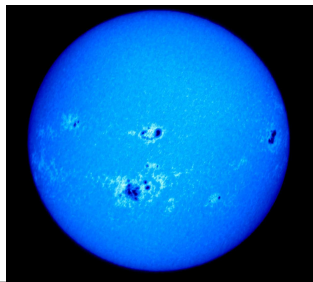
### 3 – calibration par autocollimation quart et trois quarts d'onde



## *Aspects multi longueur d'onde du soleil*

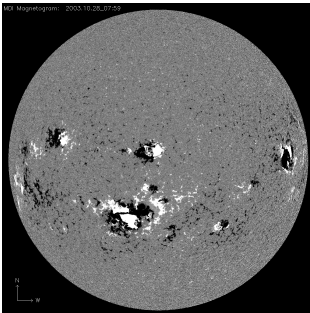


Photosphère en NiI et CaII

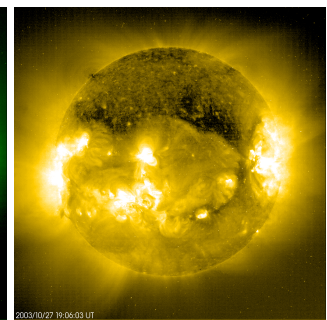
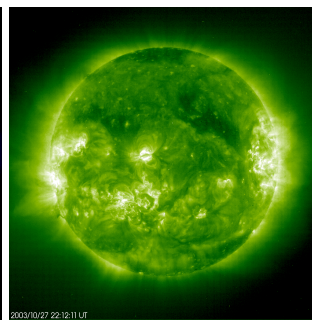
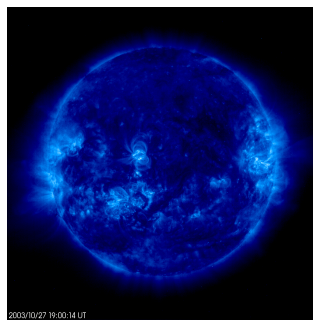
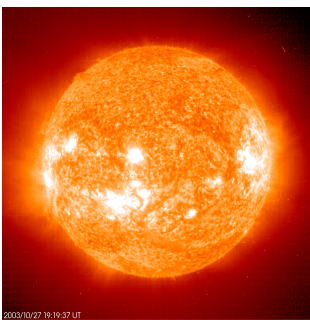


Chromosphère en H $\alpha$

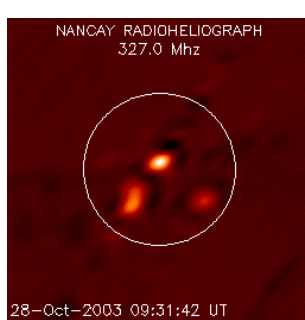
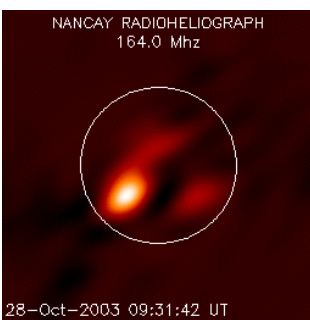
Les raies spectrales d'absorption du spectre de la lumière visible révèlent les basses couches de l'atmosphère dont la température varie entre 4500 et 8000 degrés, la photosphère et la chromosphère (Observatoires de Meudon et instrument MDI/SOHO)



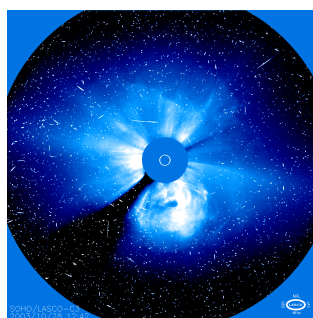
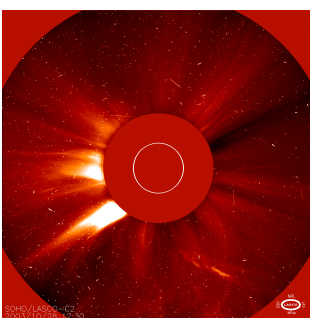
L'effet Zeeman sur les raies spectrales permet de mesurer les champs magnétiques dans la photosphère du soleil, qui sont à l'origine de l'activité de l'étoile (raie NiI, MDI/SOHO)



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 ».