



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. 2014. hal-00785323v3

HAL Id: hal-00785323

<https://hal.science/hal-00785323v3>

Preprint submitted on 24 Jun 2014

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

JMM, version 2, Juin 2014

Historique: un siècle d'observations quotidiennes à Meudon 2

Instruments de service (soleil entier)

Spectrohéliographe 7

Spectrohéliographe, future version 2 (2015) 13

Anciens instruments de service (soleil entier)

Ancien Héliographe H alpha, 656.3 nm "lambda variable" 17

Lunette CaII raie H 396.8 nm 25

Lunette CaII raie K 393.3 nm 31

Lunette continu vert 530 nm 37

Lunette bande G 430.7 nm 40

Lunette de réserve CaII raie K 393.3 nm 43

Lunettes de réserve Lunt et DayStar Halpha 656.3 nm 45

Lunette de réserve Baader Continuum H K 385 nm 48

Instruments de recherche

Tour Solaire, spectrographe classique en simple passage à fente fine 51

Tour Solaire, spectrographe à Double Passage Soustractif Multicanal 59

Tour Solaire, voie imagerie monochromatique (filtres) 65

Tour Solaire, polarimétrie, les méthodes 66

Tour Solaire, polarimétrie, les éléments optiques disponibles 69

I - Cent ans d'observations solaires à Meudon

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

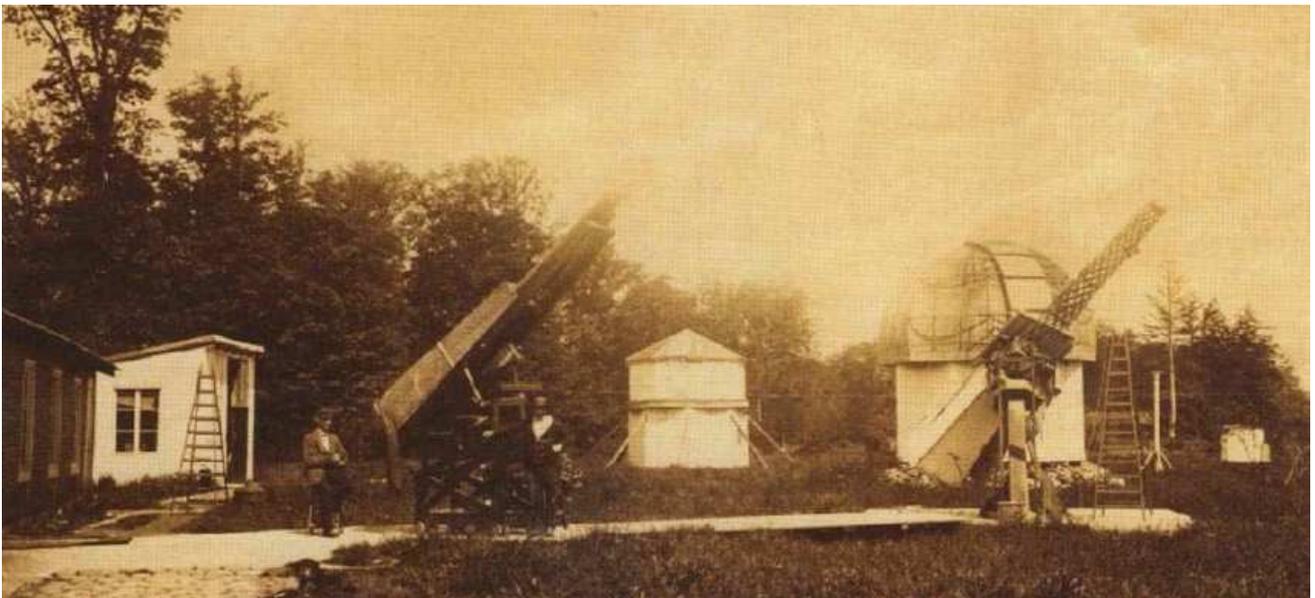
Quels sont les instruments encore en fonctionnement à Meudon ? Ce document décrit à l'attention des utilisateurs scientifiques potentiels des données produites les instruments solaires en activité occasionnelle ou permanente, comme ceux de surveillance de l'activité solaire du Service d'Observation SO6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

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

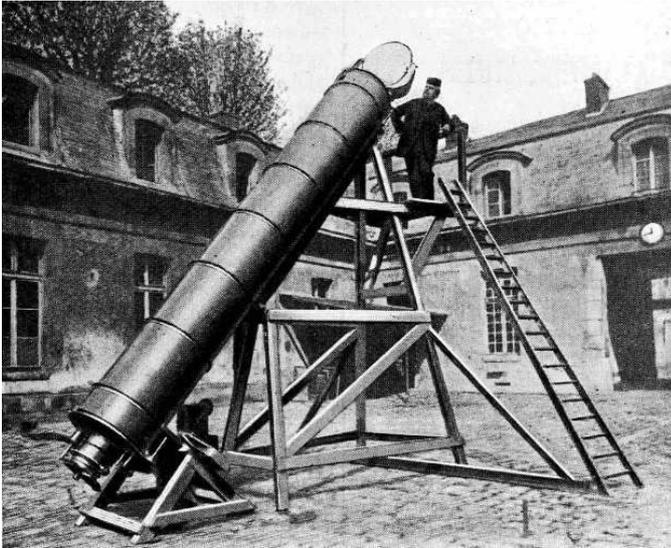
http://solaire.obspm.fr/images/documentation/Histoire_des_observations_solaires_Meudon.pdf

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

Quelques illustrations inédites



Lunettes solaires de Janssen vers 1878 à Meudon © Obs Paris



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

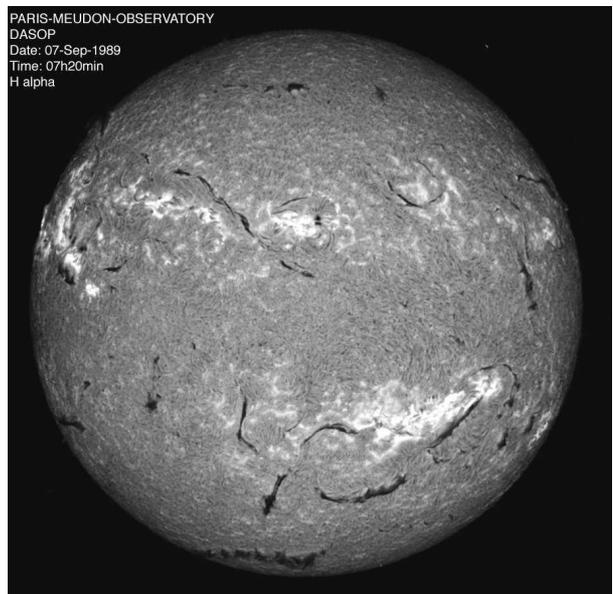


L'éphémère Observatoire du Mont Blanc dura 15 ans ; il fut conçu et érigé à Meudon avant son transport en pièces détachées (des centaines de charges de porteurs !). La lunette de 12 pieds, dont l'axe devait garder une orientation fixe alignée sur l'axe du Monde, y fut montée en sidérostât polaire. Janssen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

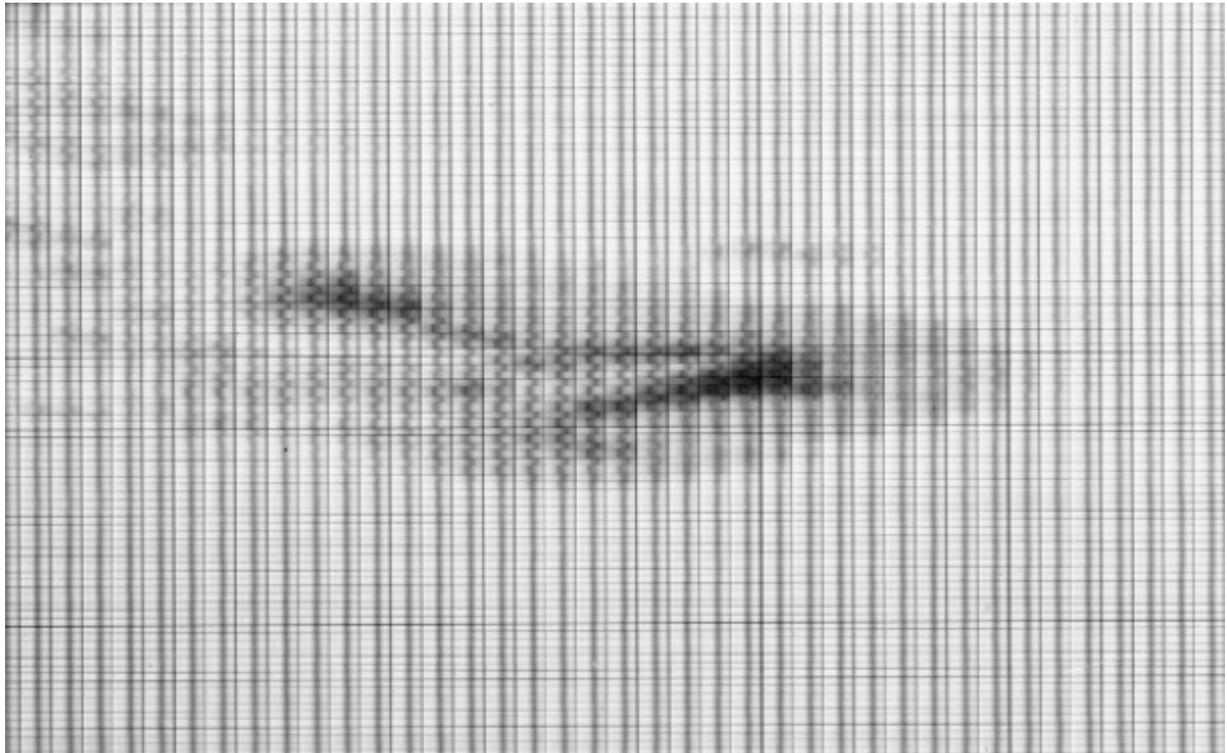


**Henri
Deslandres**
© Obs Paris

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



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



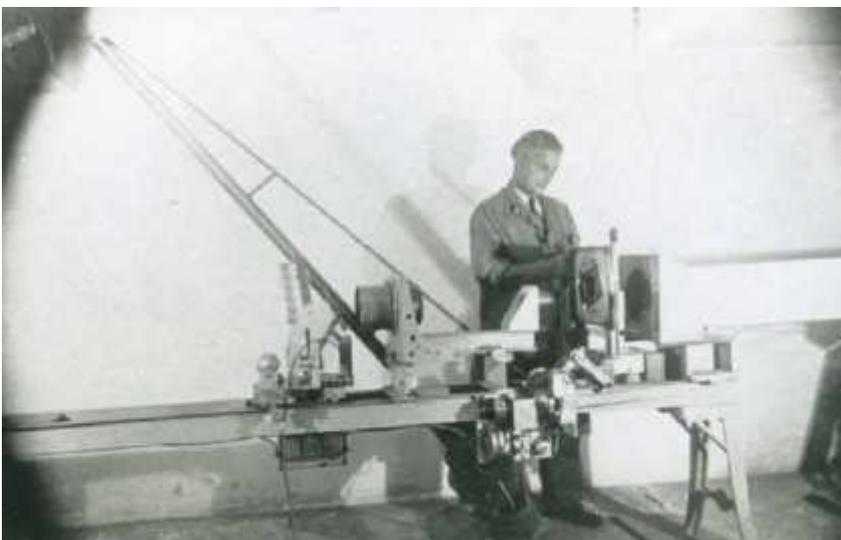
Les premières observations spectro polarimétriques ont été réalisées à Meudon vers 1962 avec la grille de Hale contenant un matériau quart d'onde : les composantes circulaires droite et gauche de l'effet Zeeman sont mises en évidence sur la tache (lignes alternées) ; chaque colonne donne le spectre (raie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



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

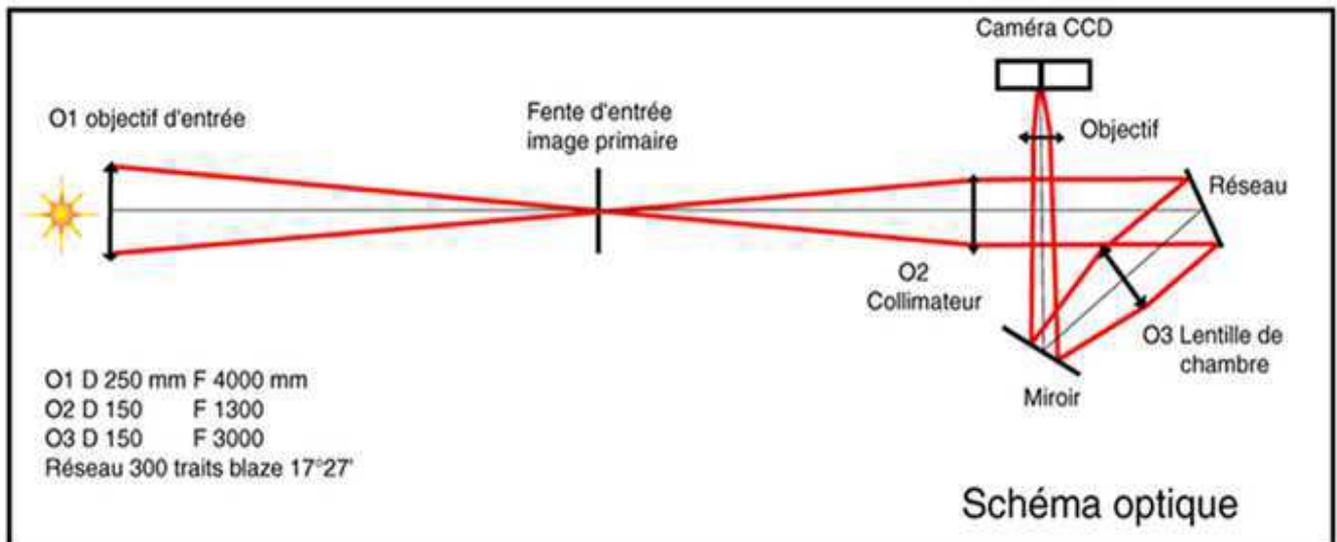


Bernard Lyot (à gauche) et Lucien d'Azambuja (à droite) à Louksor en 1952 © Obs Paris



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

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

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

2 - Pouvoir séparateur théorique

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

0.6 arc sec dans le bleu à 393 nm

1.0 arc sec dans le rouge à 656 nm

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

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

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

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

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

4 - Dispersion, pixel spectral et résolution spectrale

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Quelle est la valeur du pixel spectral en Å ?

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

Pour $k = 5$, 1 pixel = 0.13 Å

Pour $k = 3$, 1 pixel = 0.22 Å

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

Pour $k = 5$, $d\lambda = 0.15$ Å

Pour $k = 3$, $d\lambda = 0.25$ Å

5 - Distance dans le spectre entre les deux raies

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

6 - Capteur CCD de Princeton Instruments

CCD Array

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

Format

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

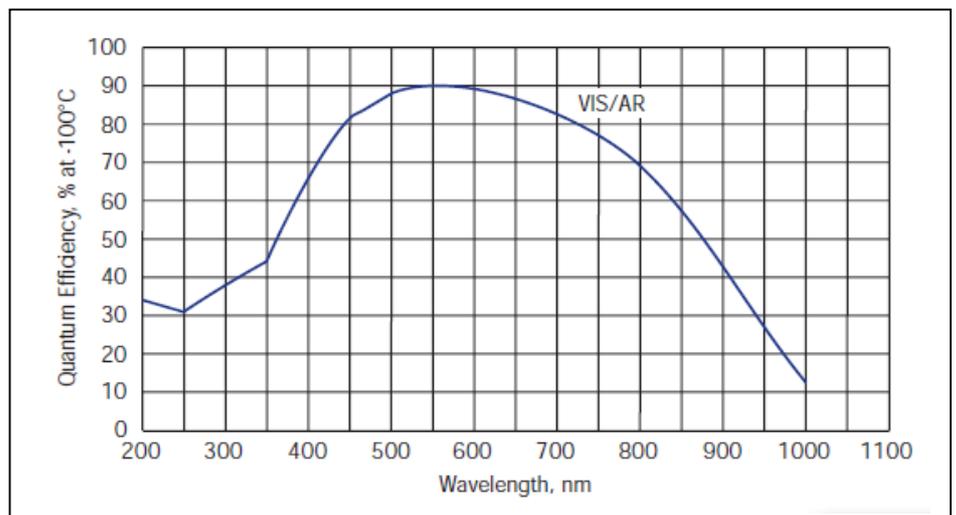
Spectrometric Well Capacity

200,000 electrons

Readout Noise

2-4 electrons at 50 kHz;

6-9 electrons at 1 MHz



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

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

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

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

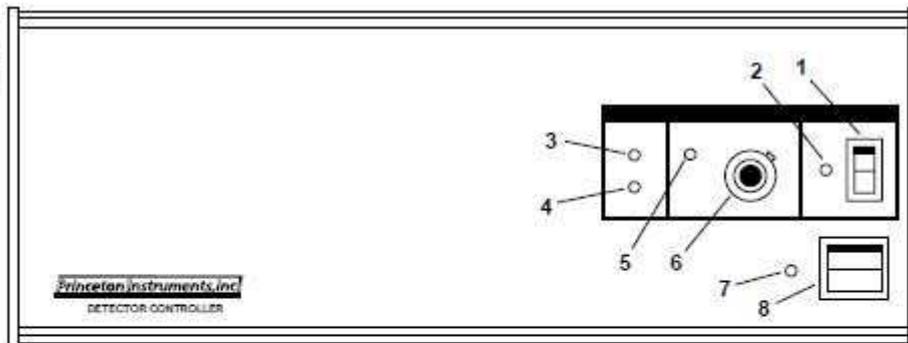
A mi saturation, le rapport S/B est excellent et d'environ $300 = 100000^{1/2}$

Le capteur est refroidi à -40° 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.

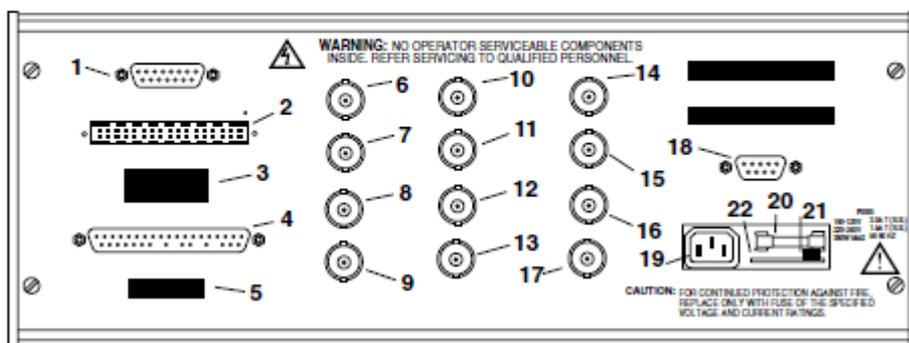
Figure 5.
ST-138 front panel



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

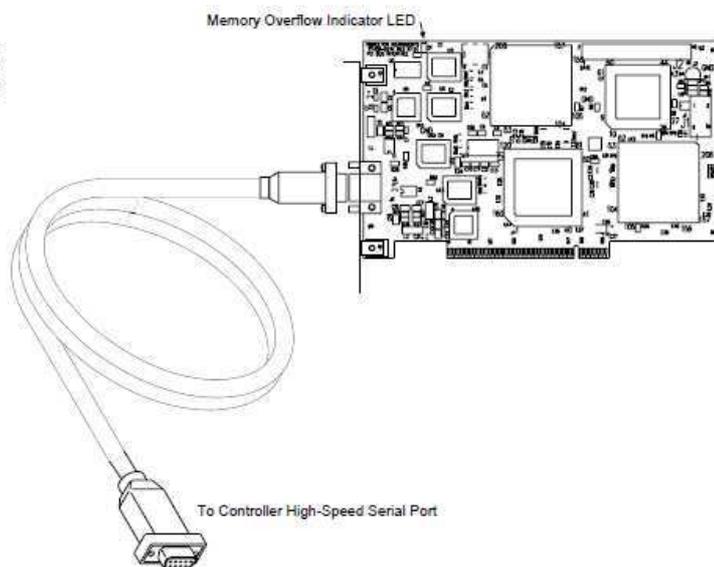
Figure 6.
ST-138 rear panel



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 coélostat. 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 Halpha, 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.

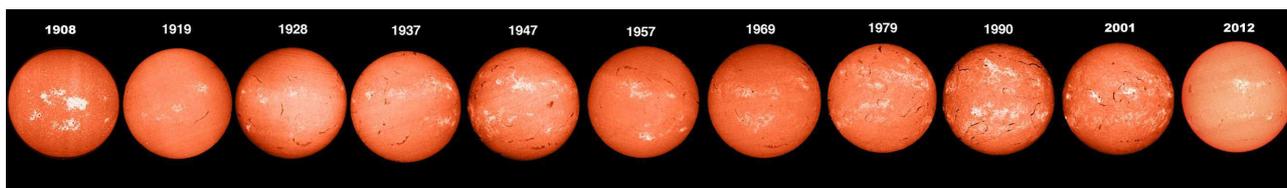
Il pilote le chariot porte objectif, le positionneur à filtres, la coulisse porte caméra et la caméra CCD. Le programme exécute WINVIEW, le logiciel de Princeton Instruments, en tâche de fond. Les images sont écrites en format TIF 16 bits.

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.

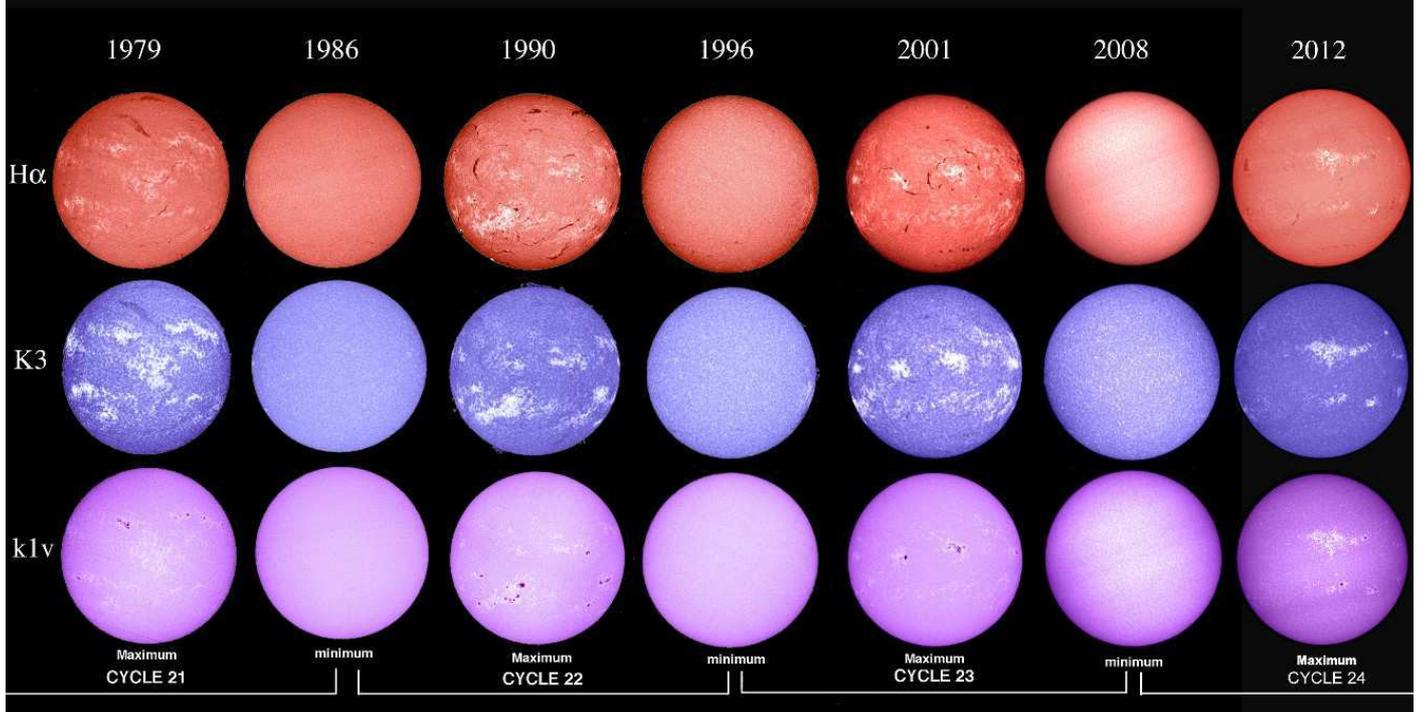


Fente du spectrographe (à gauche) et miroirs du coélostat (à droite)



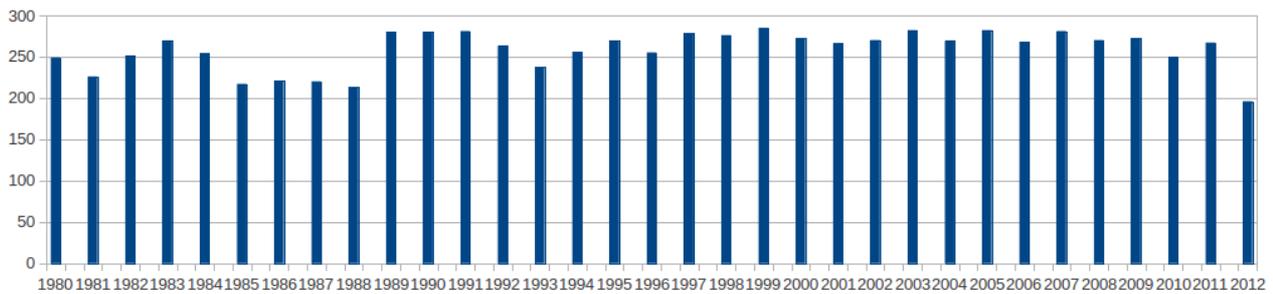
Cycles solaires en Halpha au spectrohéliographe

CYCLES DE 11 ANS

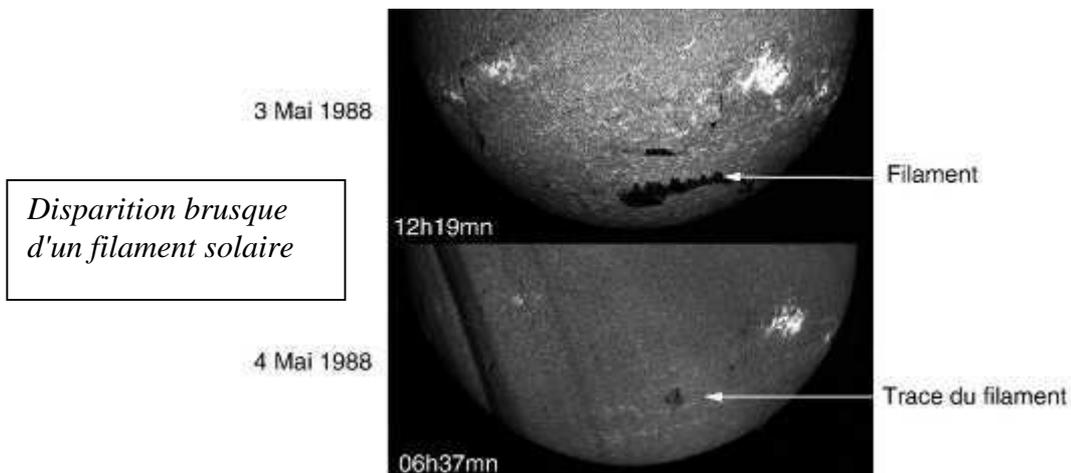


10 cycles solaires ont été observés à Meudon avec le spectrohéliographe

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 - Spectrohéliographe de Meudon version 2 (en cours de réalisation)

1 - Rappel des données optiques

Image solaire : diamètre 37.2 mm

Collimateur : $f_1 = 1.30$ m

Objectif de chambre f_2 : *plusieurs possibilités* entre zoom Sigma 120-300 mm, ou objectif fixe Nikon 300 mm, ou objectif fixe Sigma 400 mm, multiplicateur de focale 1.4 x disponible

Hauteur du spectre : $37.2 * f_2/f_1$

Réseau blaze $b = 17^\circ$, 300 traits/mm, incidence $b-10^\circ$, direction de diffraction $b+10^\circ$

$\sin(b-10) + \sin(b+10) = k \lambda/a$, $a = 1/300$ mm, d'où $k = 3$ (Halpha), 4 (Hbeta), 5 (CaII K ou H)

Halpha à l'ordre $k = 3$, Hbeta à l'ordre $k = 4$, CaII K et H à l'ordre $k = 5$

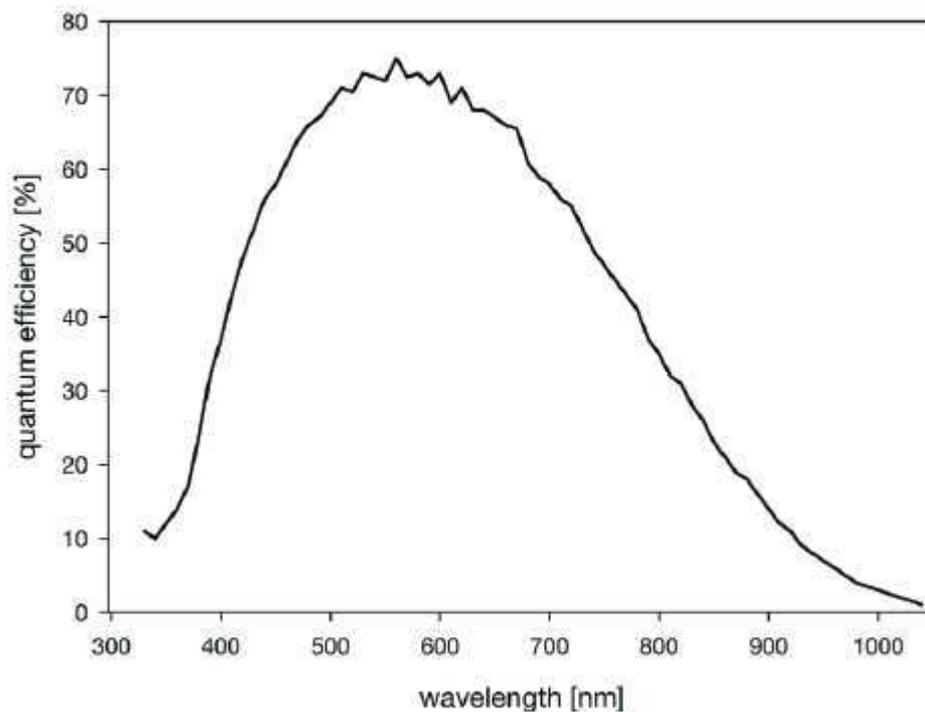
Distance Halpha – CaII K = $+6 * 10^{-4}$ rd, distance Halpha – CaII H = $-5 * 10^{-3}$ rd, distance Halpha – Hbeta = $+8 * 10^{-3}$ rd, l'angle provenant de la formule suivante :

$\Delta\alpha = (k_1 \lambda_1 - k_2 \lambda_2) / [a \cos(b+10)]$, avec $k_1 = 3$ et $\lambda_1 = 6563 \text{ \AA}$

Temps de balayage typique du Soleil : 30 s à 1 mn, protubérances > 1 mn

2 - Détecteur

Capteur sCMOS 2048 x 2048, PCO, pixels 6.5 microns, 30000 e, très faible bruit de 2 e, dynamique 15000, 100 images/s sur ROI de 100 pixels de large (environ) x 2048 de haut



Hauteur = $2048 * 6.5 = 13.3$ mm

Largeur = $2048 * 6.5 = 13.3$ mm

On fixe f_2 à 0.40 m (objectif fixe sigma)

Le diamètre solaire fait $37.2 * f_2/1.3 = 11.45$ mm, donc le pixel spatial mesure 1.10 arcsec (Soleil = 1920 arcsec)

Dispersion = $k f_2 / [\cos(b+10) a]$ avec $k = 3, 4$ ou 5 , $a = 1/300$ mm

f_2 fixe la dispersion à 0.041 mm/Å en H alpha, 0.054 mm/Å en H beta et à 0.067 mm/Å en CaII K ou CaII H

La dispersion et la taille du pixel fixent le pixel spectral H alpha à 0.16 Å, H beta à 0.12 Å et CaII K ou CaII H à 0.10 Å

Domaine spectral H alpha à $0.16 * 100 = 16 \text{ \AA}$, H beta à $0.12 * 100 = 12 \text{ \AA}$ et CaII K ou CaII H à $0.10 * 100 = 10 \text{ \AA}$

Distance H alpha – CaII K = $f_2 \times 6 \cdot 10^{-4} \text{ rd} = +0.25 \text{ mm}$

Distance H alpha – CaII H = $f_2 \times -5 \cdot 10^{-3} \text{ rd} = -2.0 \text{ mm}$

Distance H alpha – H beta = $f_2 \times 8 \cdot 10^{-3} \text{ rd} = +3.3 \text{ mm}$

La largeur du capteur doit être au minimum de $3.3 - (-2.0) = 5.3 \text{ mm}$ soit 815 pixels, il faut laisser une marge de réglage spectral portant cette valeur à plus de 7 mm (1100 pixels).

technical data

image sensor

| | |
|----------------------------|--|
| type of sensor | scientific CMOS (sCMOS) |
| image sensor | CIS2020 |
| resolution (h x v) | 2048 x 2048 active pixel |
| pixel size (h x v) | 6.5 μm x 6.5 μm |
| sensor format / diagonal | 13.3 mm x 13.3 mm / 18.8 mm |
| shutter mode | rolling with free selectable readouts |
| MTF | 76.9 lp/mm (theoretical) |
| fullwell capacity | 30 000 e ⁻ |
| readout noise ¹ | 0.9 _{rms} / 1.4 _{rms} e ⁻ @ slow scan 1.0 _{rms} / 1.5 _{rms} e ⁻ @ fast scan |
| dynamic range | 33 000 : 1 (90.4 dB) slow scan |
| quantum efficiency | > 70 % |
| spectral range | 370 nm ... 1100 nm |
| dark current | 2 e ⁻ /pixel/s @ 5 °C |
| DSNU | < 1 e ⁻ rms @ slow scan < 2 e ⁻ rms @ fast scan |
| PRNU | < 0.5 % |
| anti blooming factor | 1 : 10000 |

frame rate table

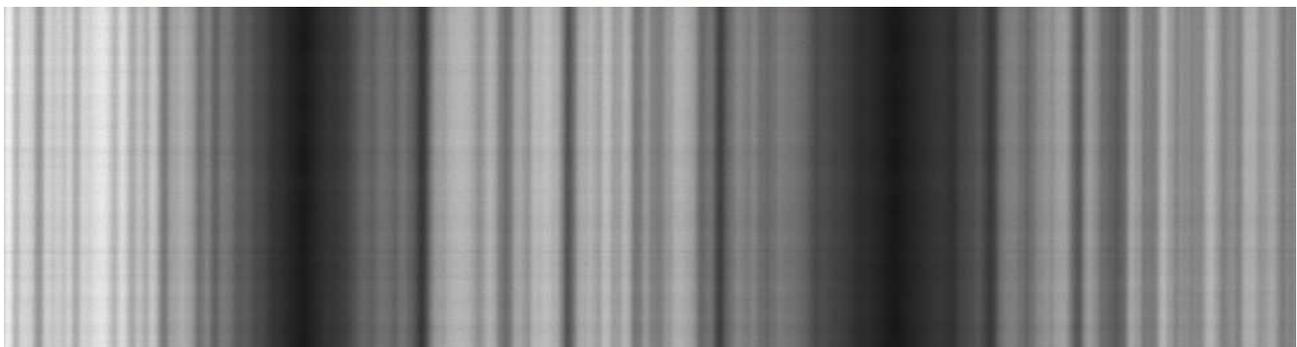
| typical examples | fast scan | slow scan |
|--------------------------|------------|-----------|
| 2080 x 2048 ² | 98.6 fps | 35.2 fps |
| 2040 x 2048 | 100.4 fps | 35.2 fps |
| 2040 x 1024 | 200.9 fps | 70.3 fps |
| 2040 x 512 | 401.8 fps | 140.7 fps |
| 2040 x 256 | 803.6 fps | 281.1 fps |
| 2040 x 128 | 1607.1 fps | 562.7 fps |
| 1920 x 1080 | 190.6 fps | 66.7 fps |
| 1600 x 1200 | 171.4 fps | 60.0 fps |
| 1280 x 1024 | 200.9 fps | 70.3 fps |
| 640 x 480 | 428.6 fps | 150.1 fps |
| 320 x 240 | 857.1 fps | 300.1 fps |

camera

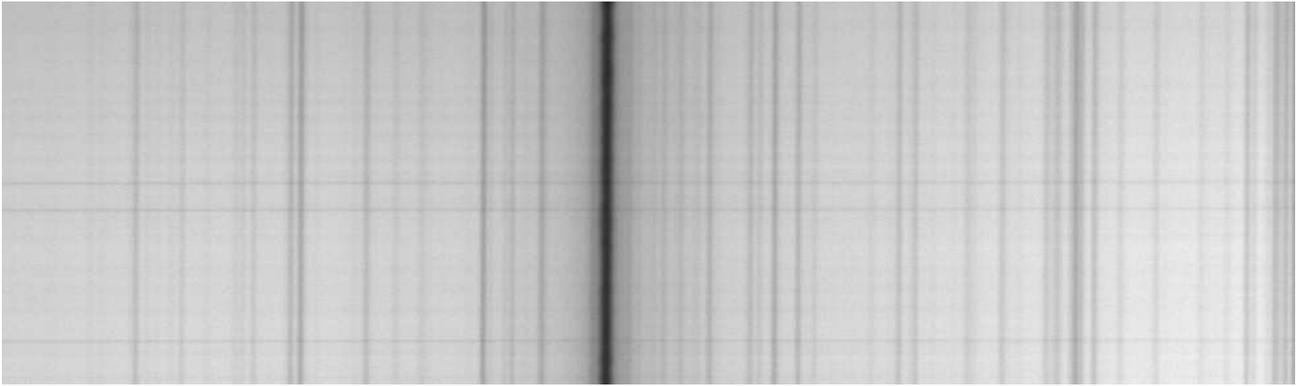
| | |
|--------------------------|--|
| frame rate | 100 fps @ 2040 x 2048 pixel, fast scan |
| exposure / shutter time | 500 μs ... 2 s |
| dynamic range A/D | 16 bit ² |
| A/D conversion factor | 0.46 e ⁻ /count |
| pixel scan rate | 272.3 MHz fast scan 95.3 MHz slow scan |
| pixel data rate | 544.6 Mpixel/s 190.7 Mpixel/s |
| binning horizontal | x1, x2, x4 |
| binning vertical | x1, x2, x4 |
| region of interest (ROI) | horizontal: steps of 40 pixels vertical: steps of 2 pixels |
| non linearity | < 1 % (range of 5 ... 90 % signal) |
| cooling method | + 5 °C stabilized, peltier with forced air (fan) / water cooling |
| trigger input signals | frame trigger, sequence trigger, programmable input (SMA connectors) |
| trigger output signals | exposure, busy, line, programmable output (SMA connectors) |
| data interface | Camera Link Full (10 taps, 85 MHz) |
| time stamp | in image (1 μs resolution) |

general

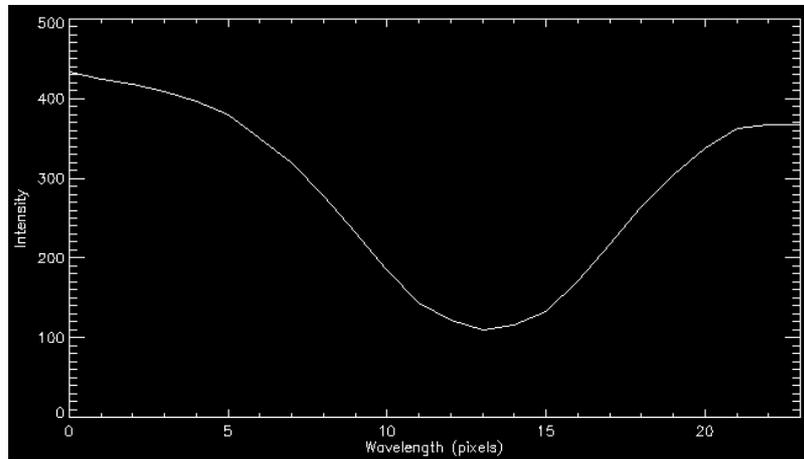
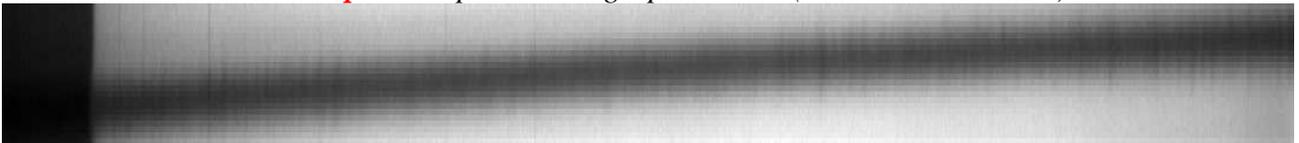
| | |
|---------------------------|--------------------------------|
| power supply | 12 ... 24 VDC (+/- 10 %) |
| power consumption | 20 W max. (typ. 10 W @ 20 °C) |
| weight | 700 g |
| operating temperature | +10 °C ... +40 °C |
| operating humidity range | 10 % ... 80 % (non-condensing) |
| storage temperature range | -10 °C ... +60 °C |
| optical interface | F-mount & C-mount |
| CE / FCC certified | yes |



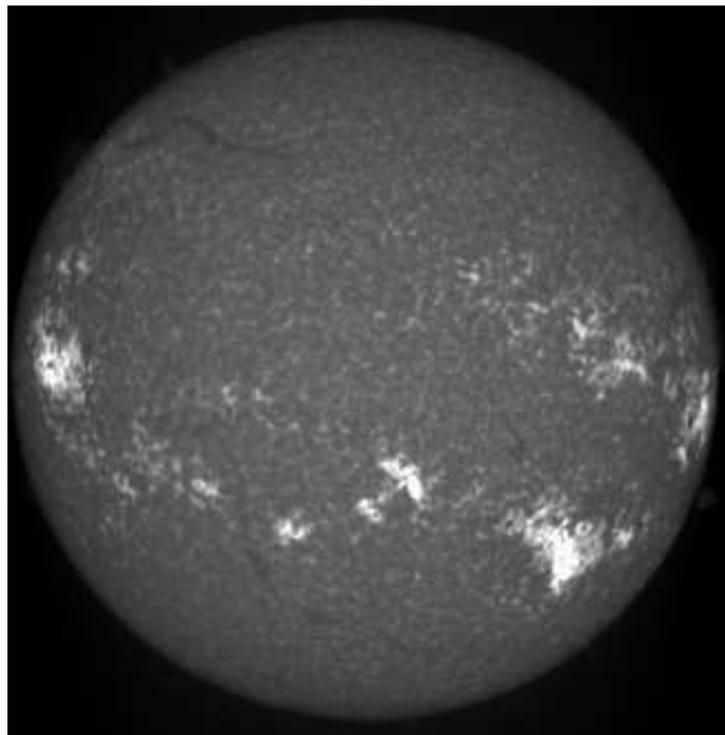
Raies H et K du calcium au spectrohéliographe bras 2 (avec caméra de test)



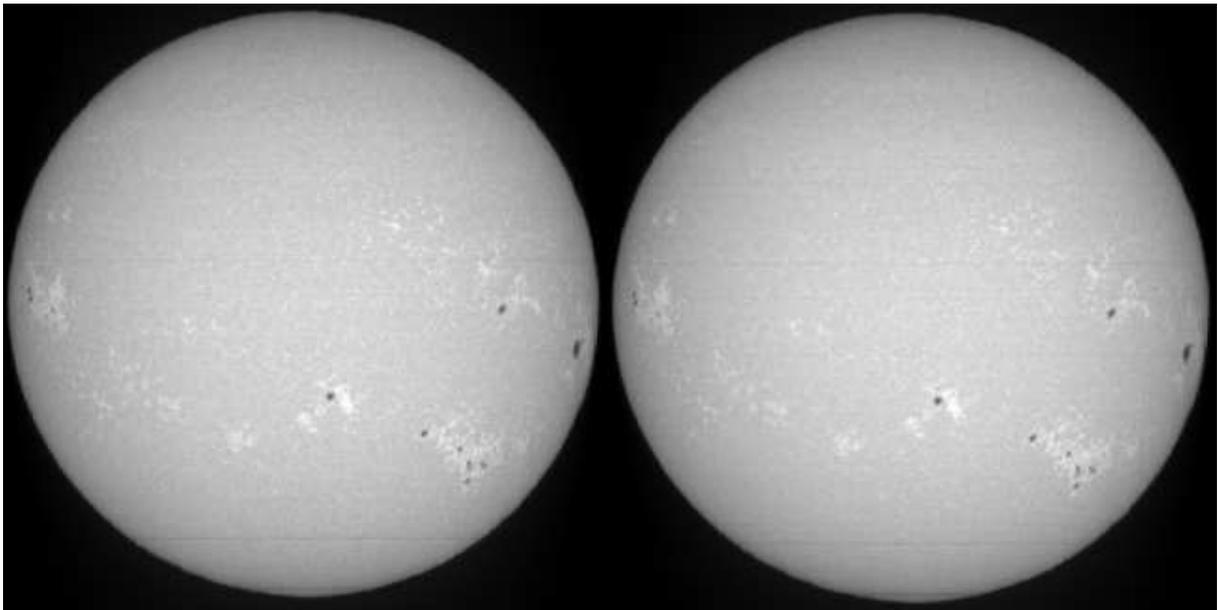
***Raie H α** au spectrohéliographe bras 2 (avec caméra de test)*



Profil H α dans un petit filament



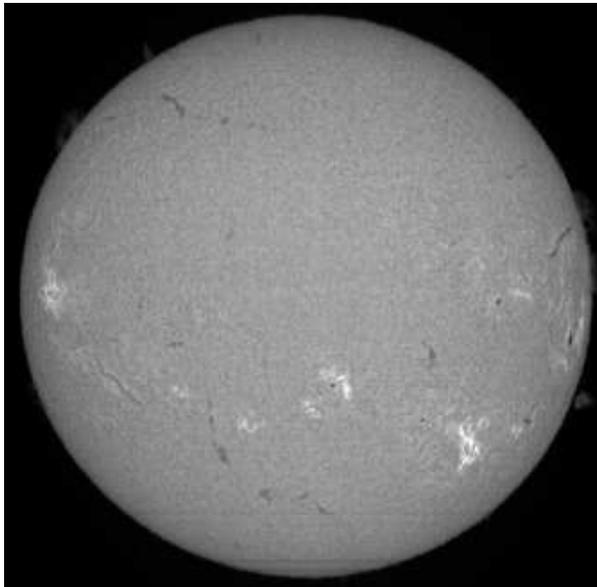
CaII K3



Call K1v

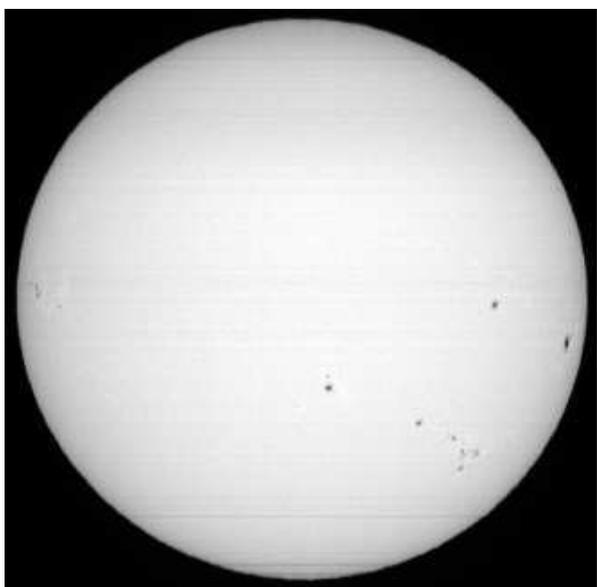
et

Call K1r

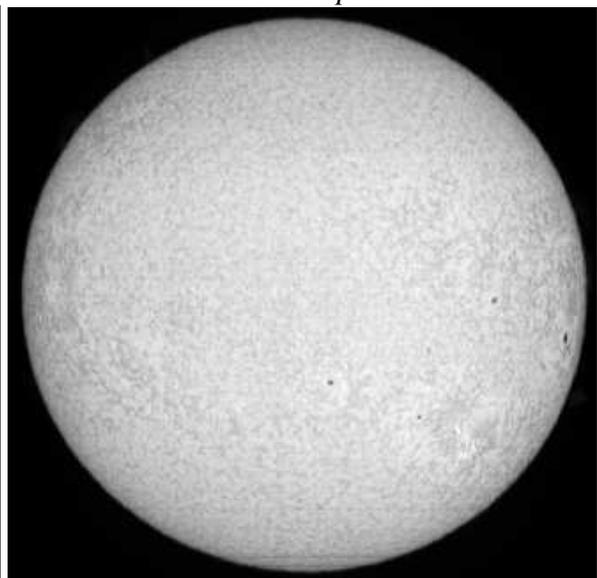
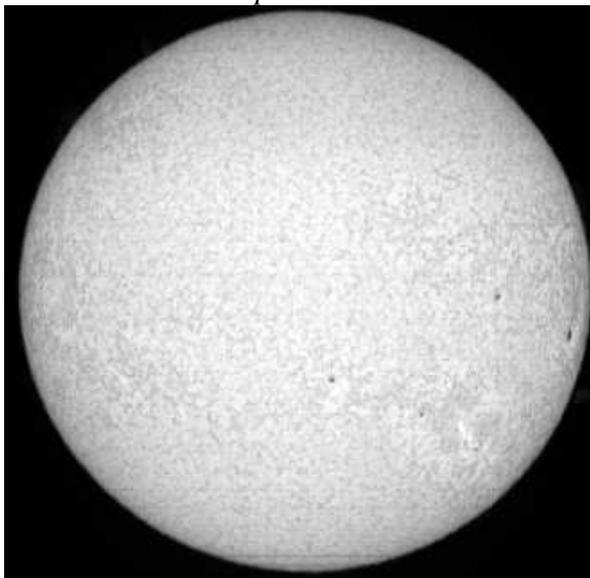


Halpha centre

et



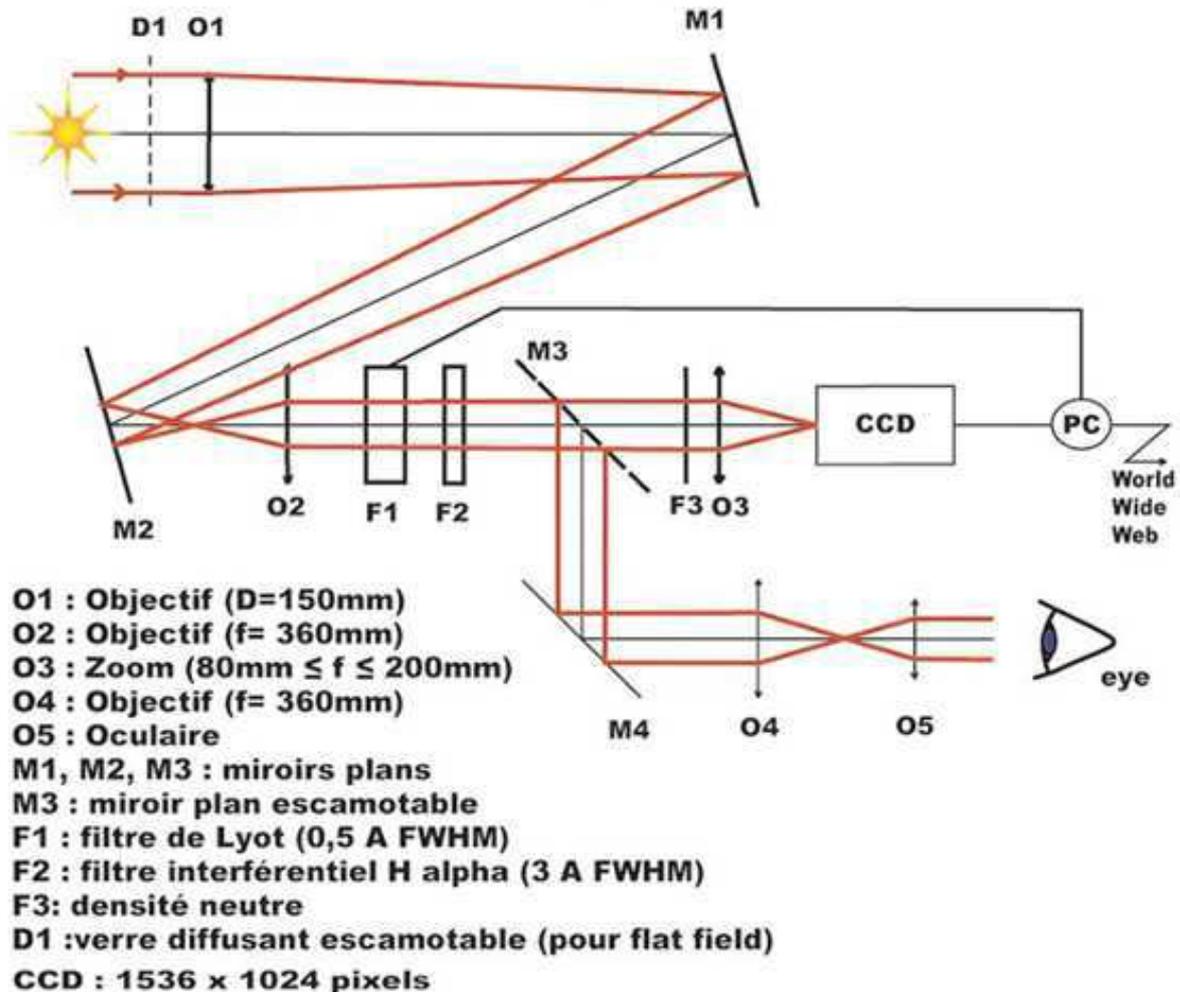
continu H alpha



Halpha aile bleue et aile rouge

IV - 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° , ou $32'$, ou $1920''$; le diamètre d de l'image du soleil au foyer est égale en sortie à $d = \alpha f_1 (f_3/f_2)$ = soit 8.1 mm (en moyenne), et 21 mm au foyer primaire.

2 - Pouvoir séparateur théorique

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

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

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

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

Caractéristiques principales :

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

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

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

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

Légende de la figure de la bande passante :

Abscisse = longueur d'onde

Trait continu = filtre primaire à 3 étages _____

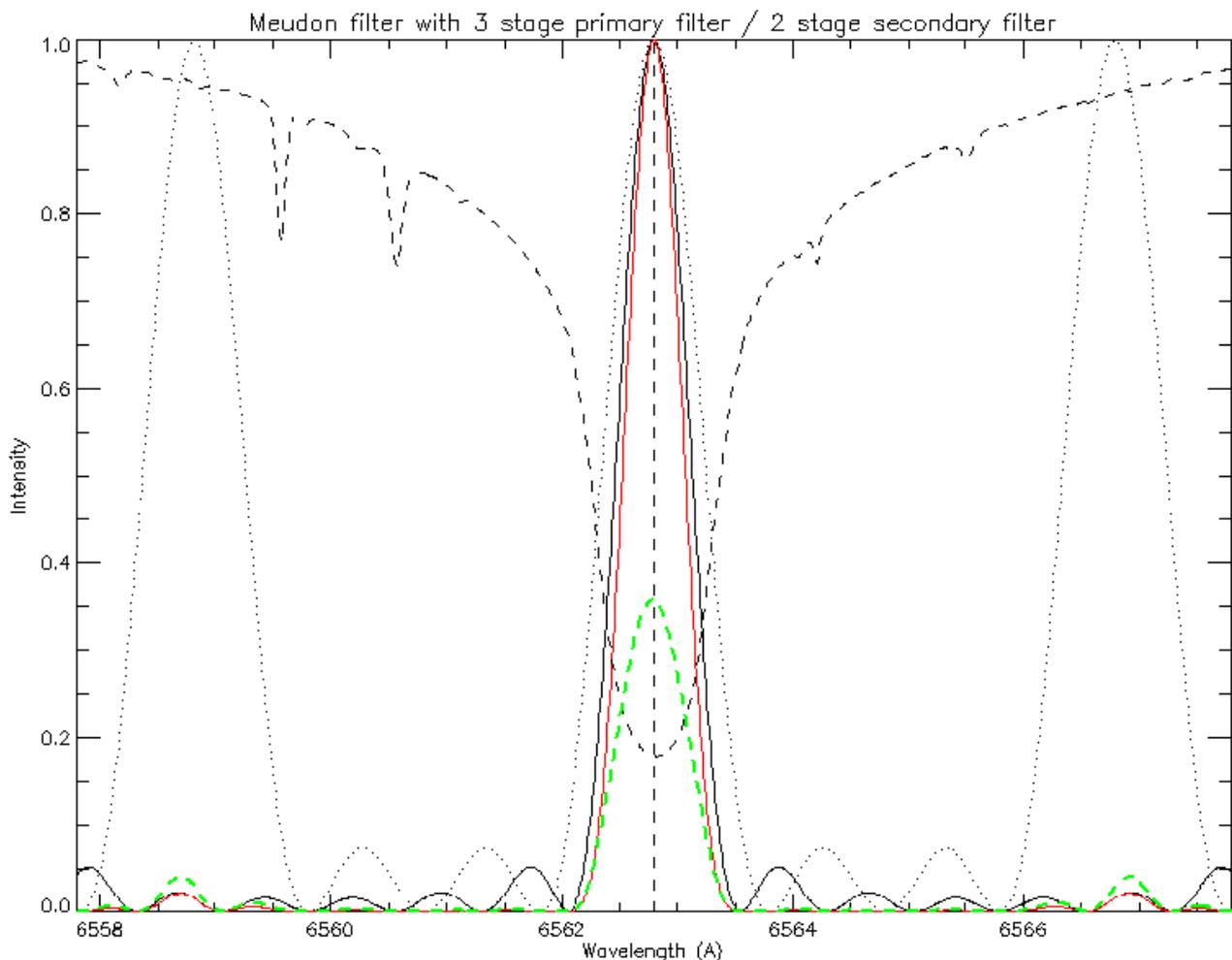
Trait pointillé = filtre secondaire à 2 étages

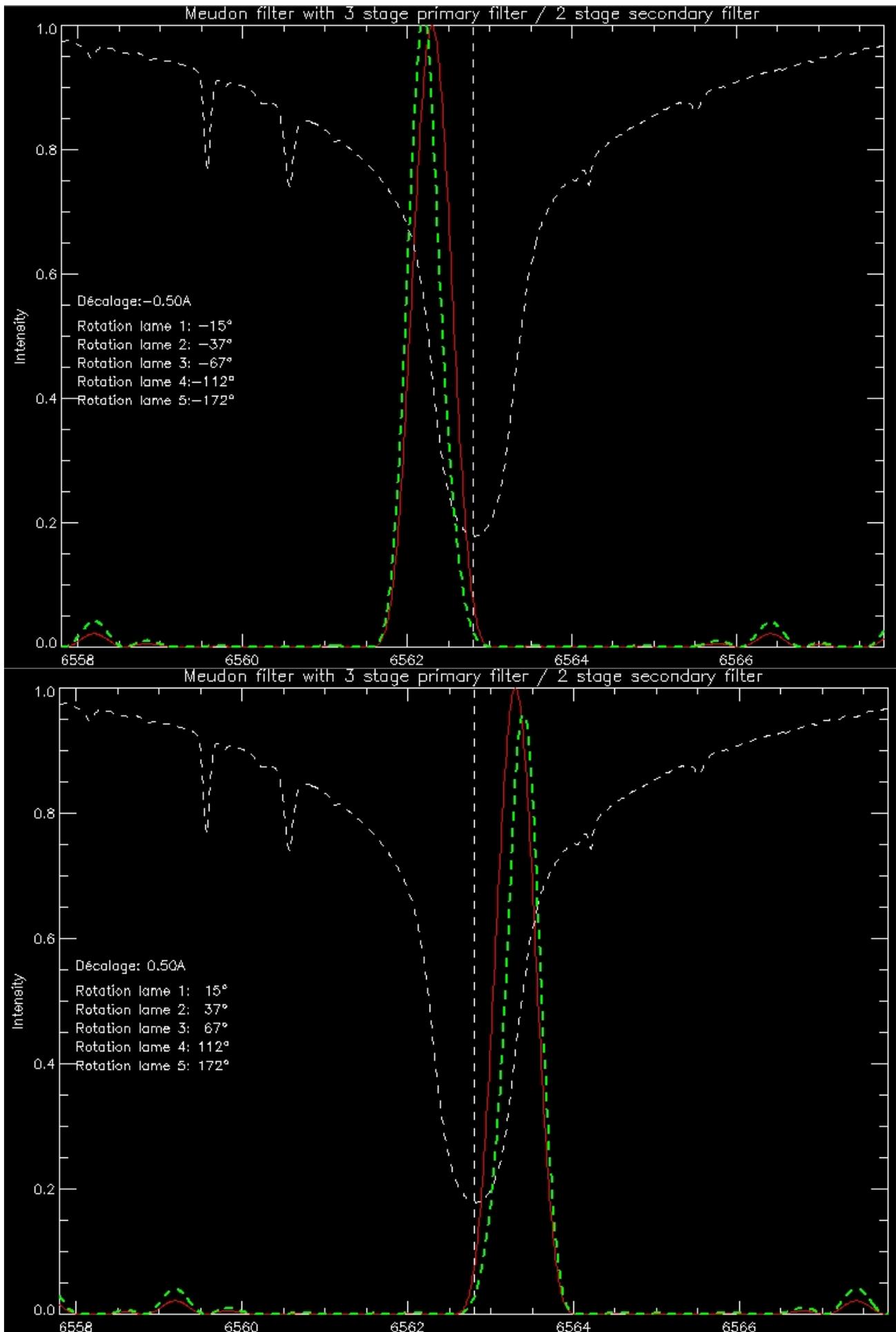
Trait continu rouge = filtre produit résultant de la combinaison primaire/secondaire _____

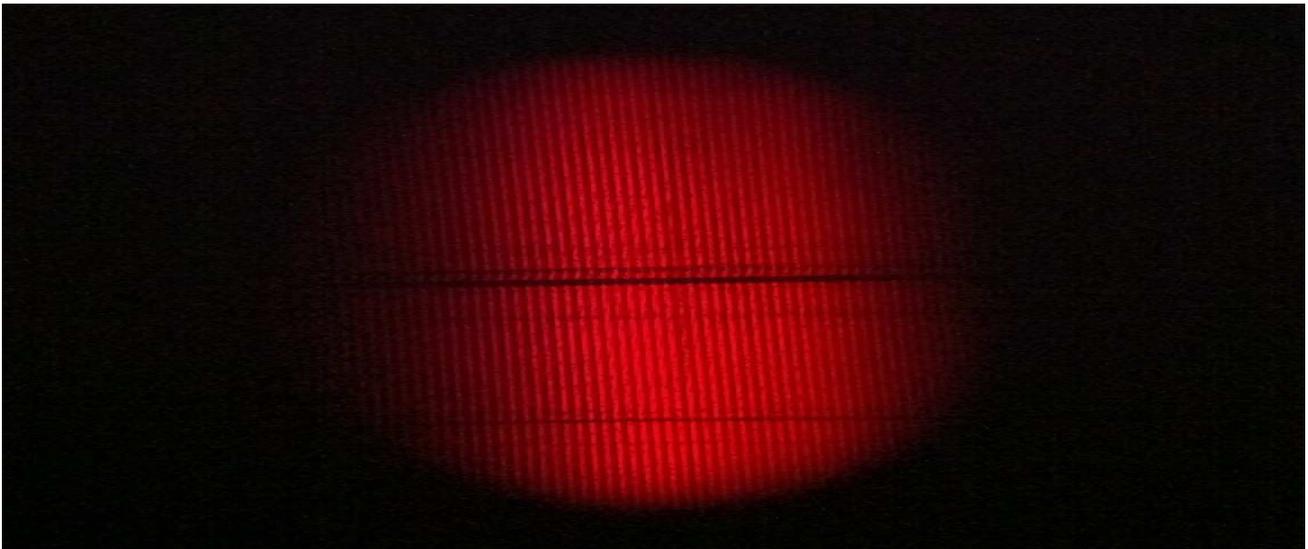
Tirets noirs = raie H α - - - - -

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

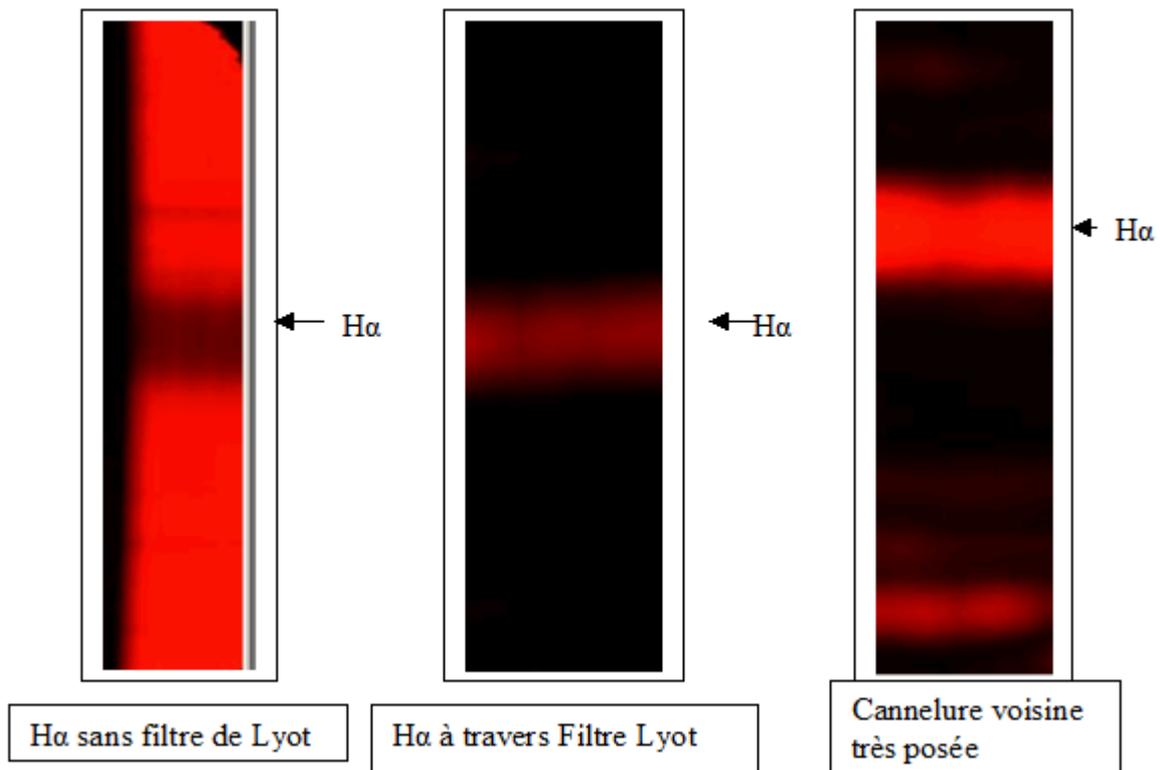
Les cannelures parasites les plus proches sont à 4 Angströms, ce qui implique une pré-filtration par un interférentiel étroit de quelques Angströms de largeur.







Cannelures espacées d'un nanomètre vues en spectroscopie à réseau de diffraction

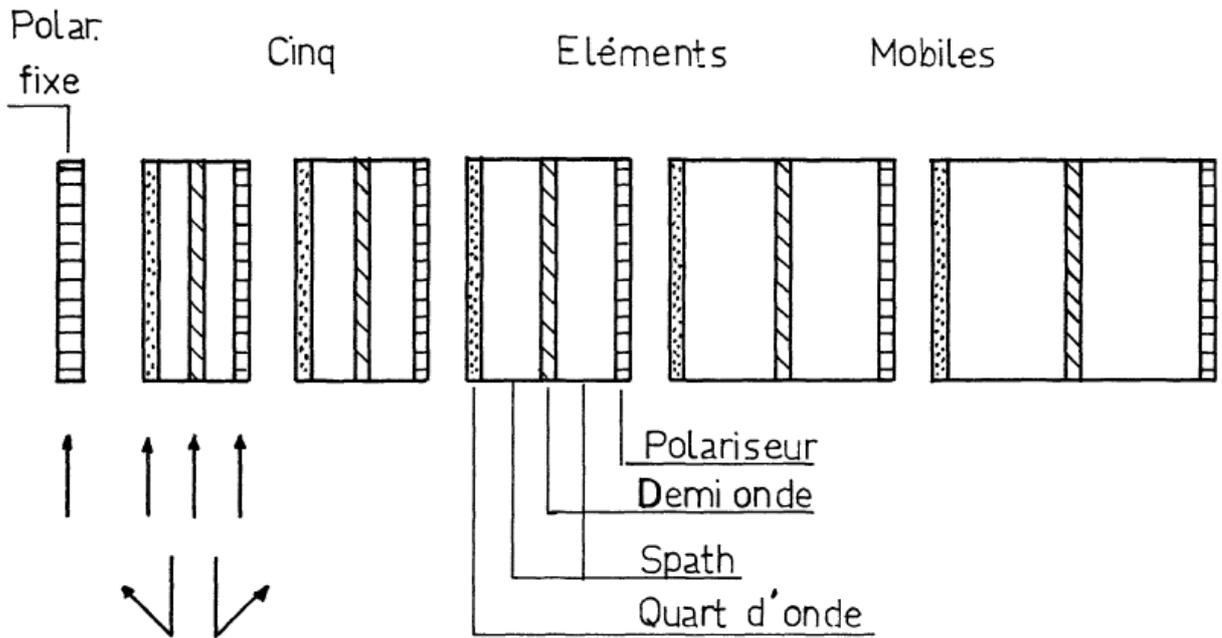


Raie Halpha en spectroscopie à réseau de diffraction à la Tour Solaire

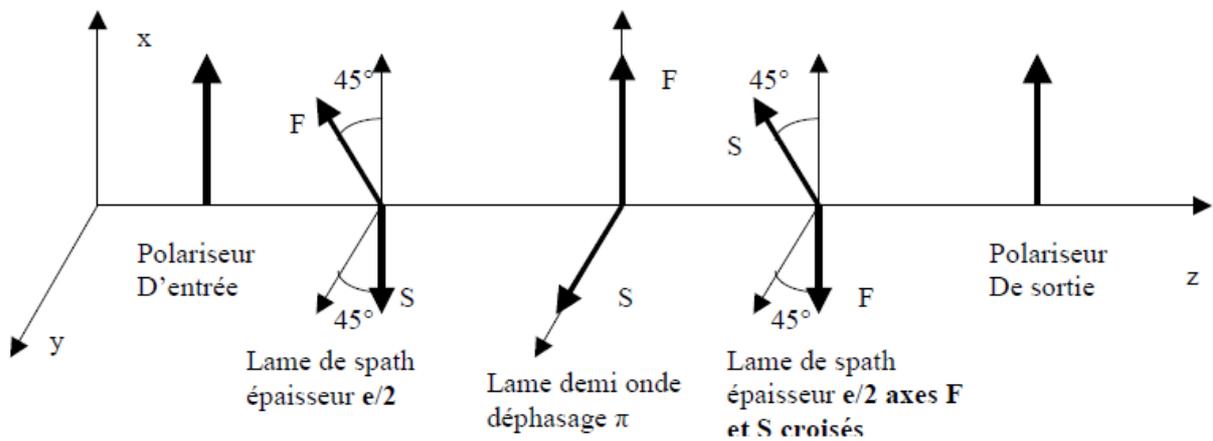
Les mesures ont été effectuées avec le thermostat N°1 avec la carte d'origine (FC) et la carte de remplacement (DZ). Le filtre étant en position ,cannelure centrée sur H α .

- carte thermostat DZ
 - Température = **46,4°**
 - Sensibilité environ 0,5A° par degré

- carte thermostat FC
 - Température **46,1° C**
 - Sensibilité environ 0,5A° par degré



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).

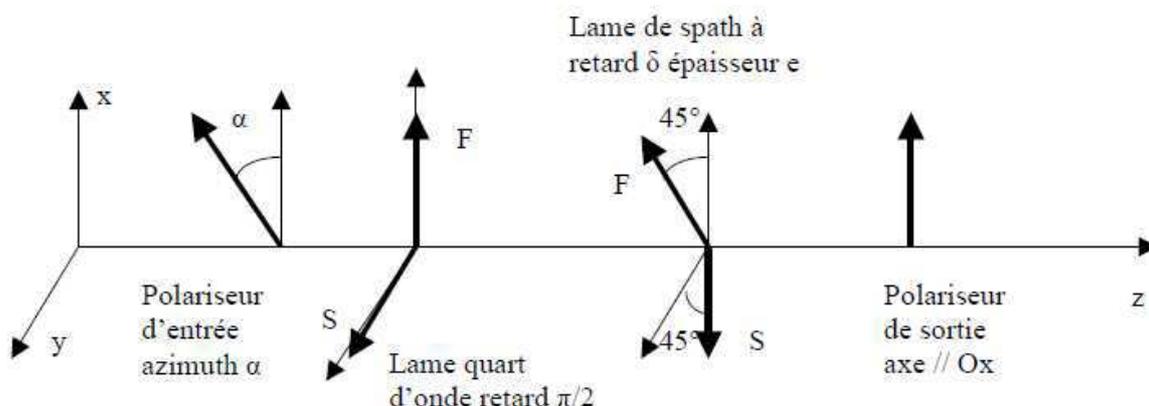
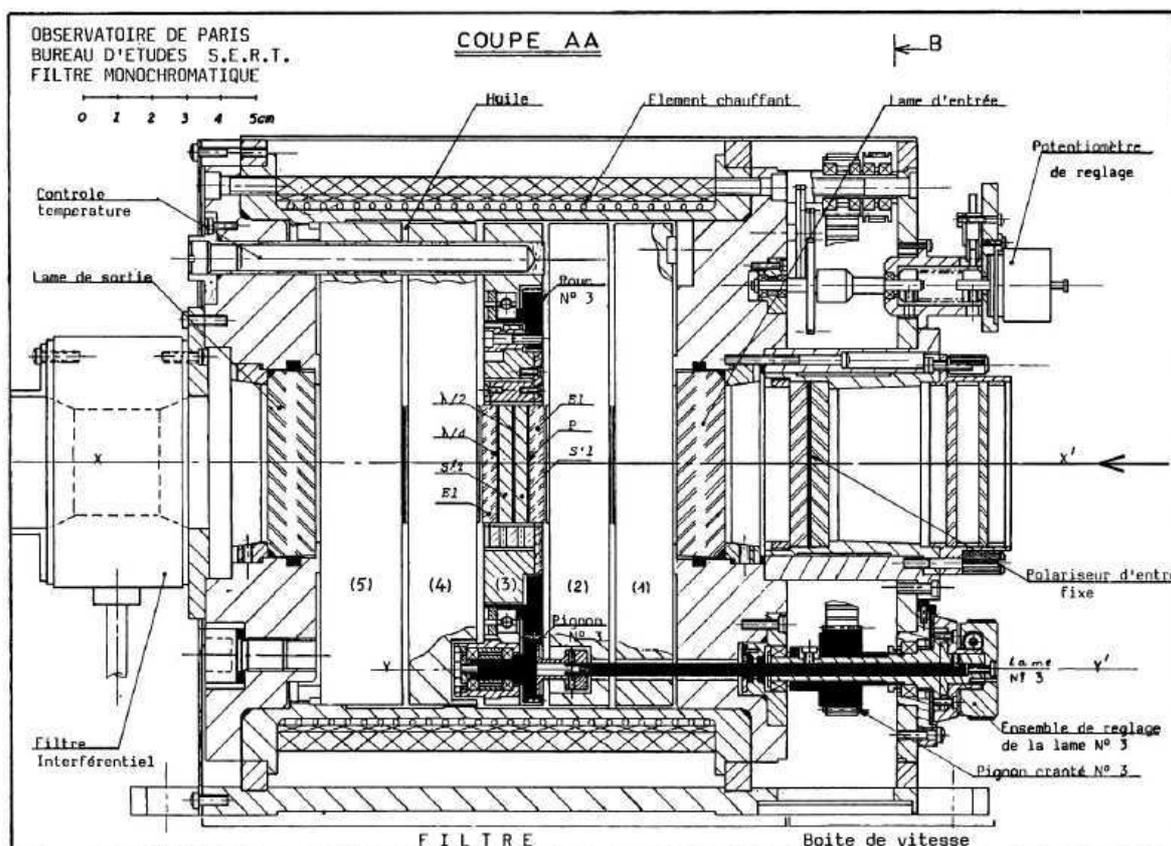


Principe de l'étage de LYOT à grand champ



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

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

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

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

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

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

4 - Capteur CCD

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

Spectrometric Well Capacity

85,000 electrons

Readout Noise

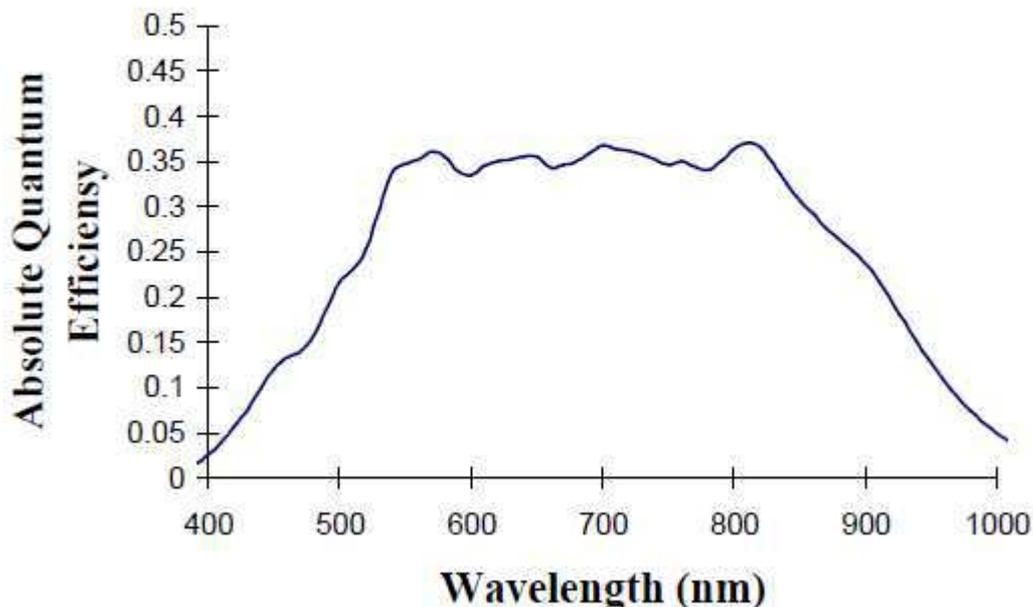
20 electrons at 1 MHz

Dynamic Range 12 bits (4096 niveaux)

Operating Temperature -20°C

Scan Rate 1 MHz

KAF-1600 Spectral Response



La caméra fonctionne à la vitesse de 1 MHz donnant une dynamique de $85000 e / 20 e = 4000$ (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° 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

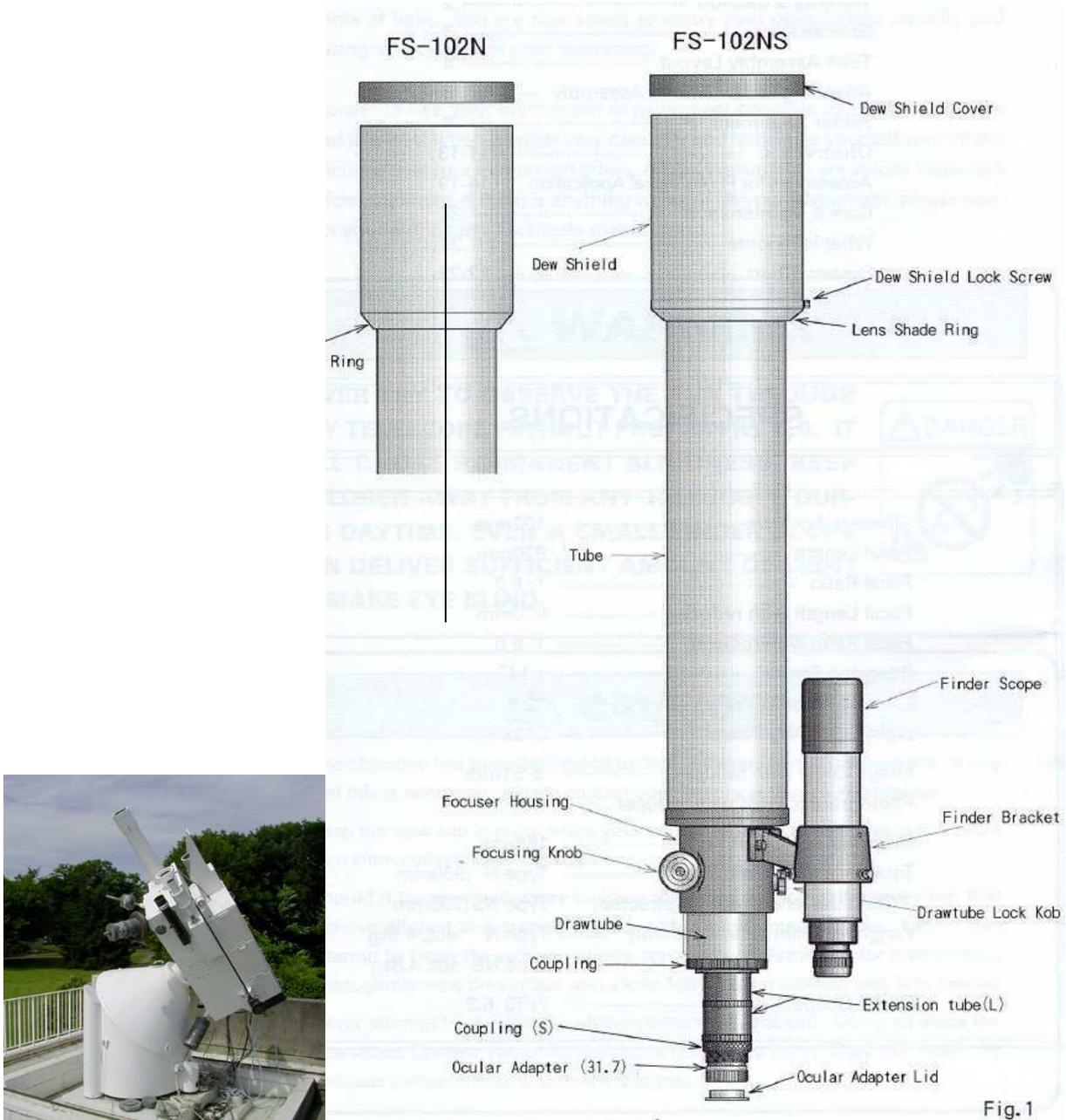
Electronique de commande TTL réalisée par François Colson.

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



Héliographe Ha au centre

V - 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

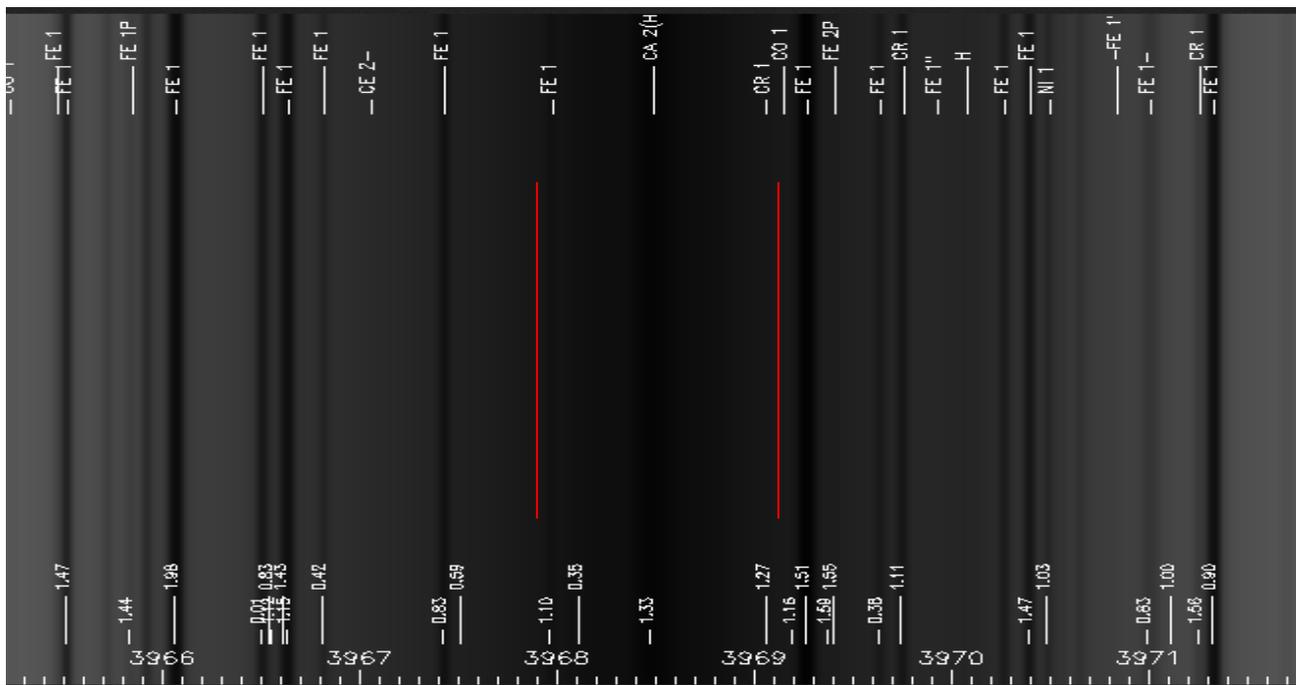
Lunette fluorite à deux verres (doublet apochromatique) de marque Takahashi, modèle FS102N, $D = 102$ mm, $F = 820$ mm.

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°).

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 \AA à mi-hauteur. Ce filtre fait 25 mm de diamètre. Il est centré correctement pour la température de 23°C sur 396.85 nm en

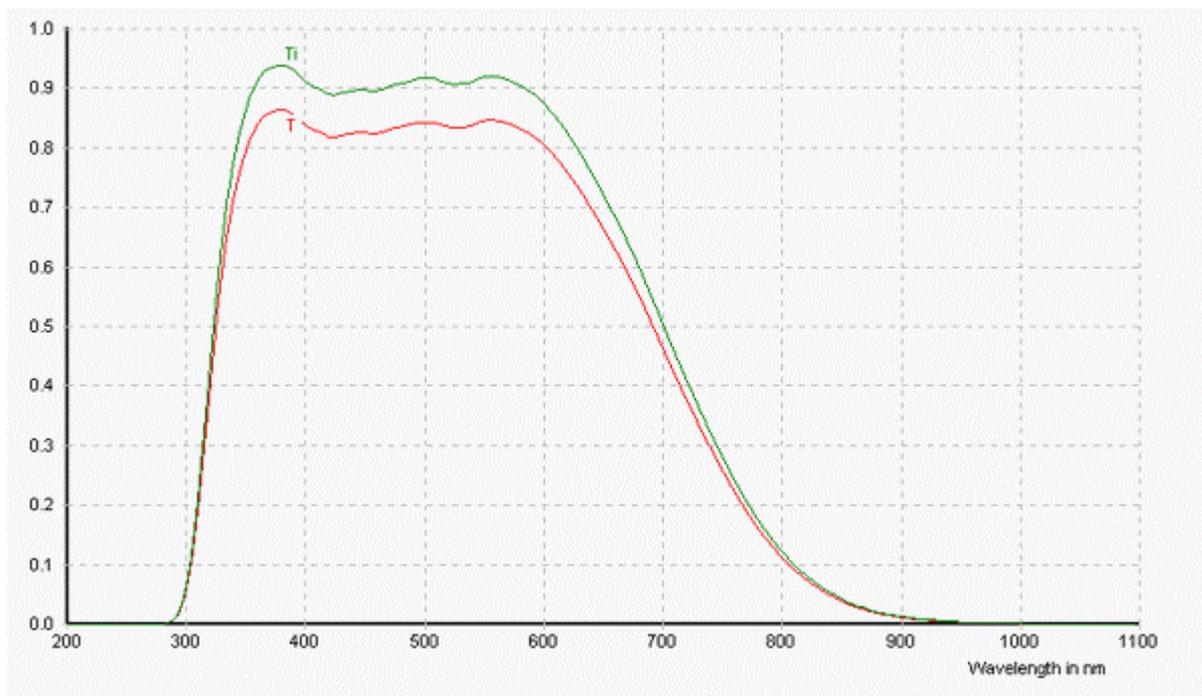
faisceau collimaté (396.80 pour un cône de demi angle 2.5°). Le constructeur donne une dérive très faible de 0.02 Å par °C de la bande passante.

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



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

2 - Courbe de transmission du filtre anti-calorique KG3



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

3 - Courbe de transmission du filtre Barr

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

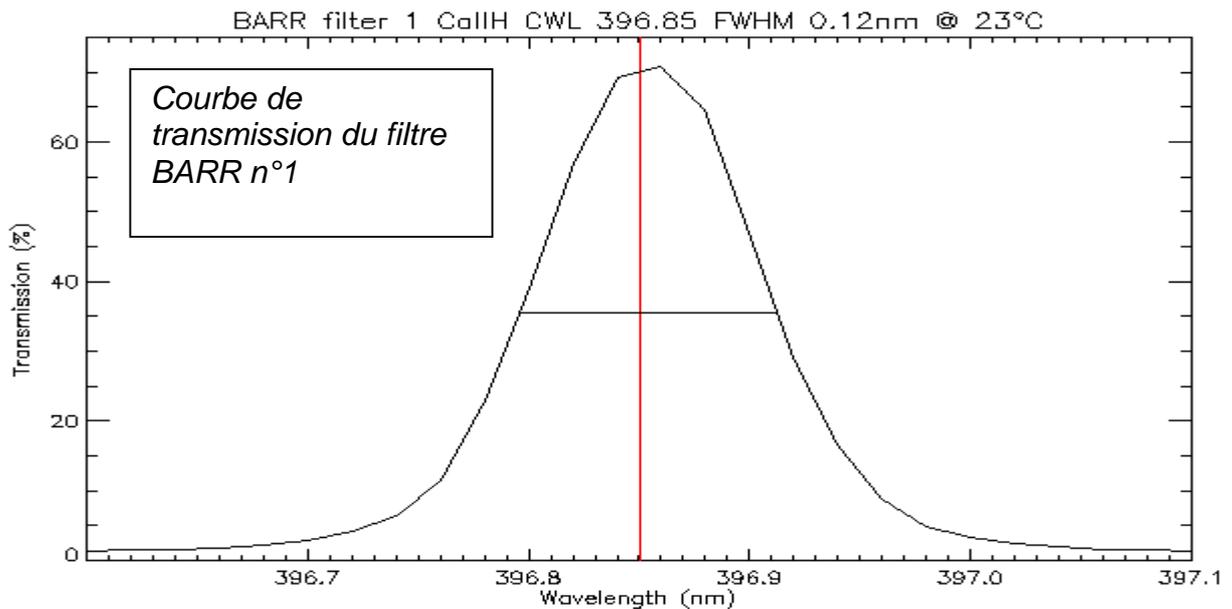
2 filtres ont été commandés. Le filtre 1 est monté sur la lunette.

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

P/N: 396.85/0.15nm

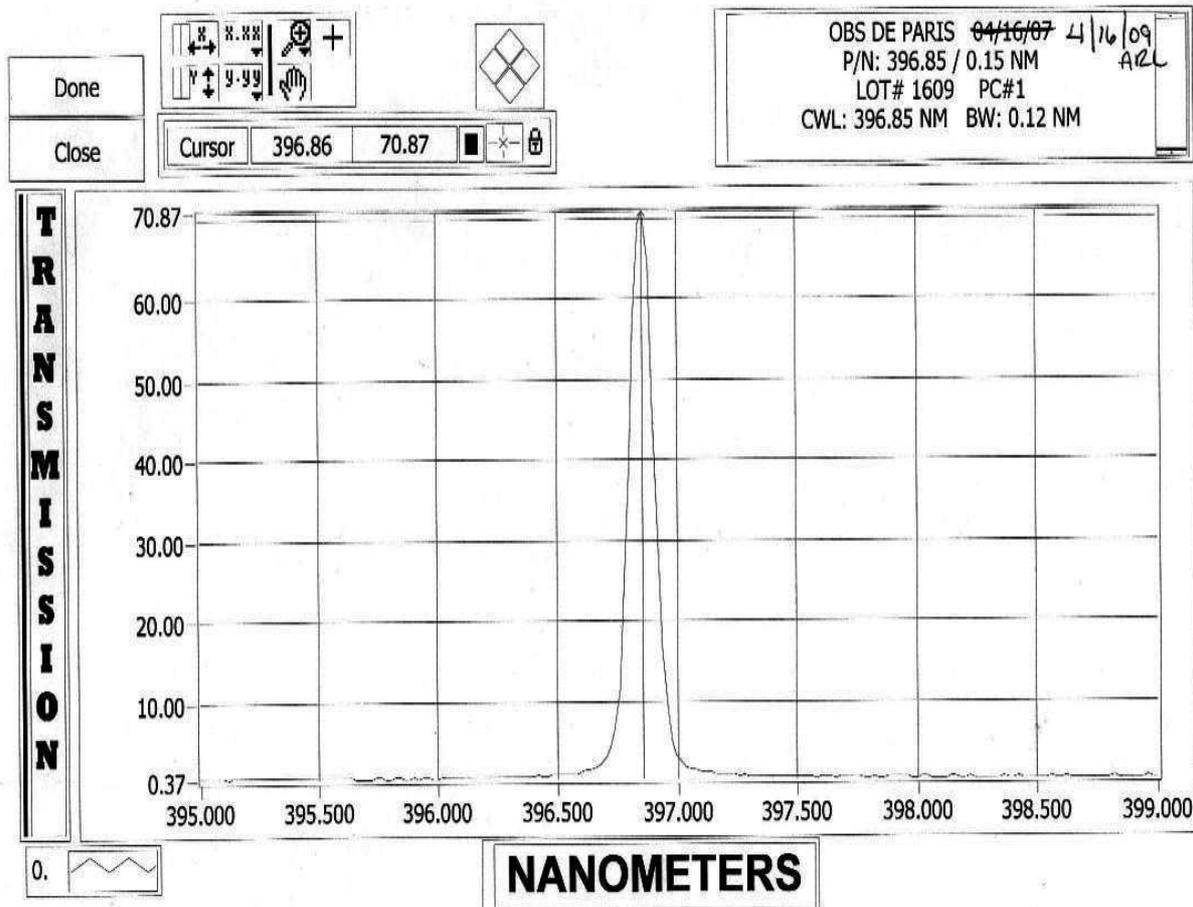
Lot#: 1609

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



Bande passante du filtre Barr

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.

6 - Données relatives au capteur et caméra

Capteur CMOS IBIS 6600 de CYPRESS

Puits de potentiel maximum = 21500 e⁻

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

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

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

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

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

Conversion A/D: 21 e⁻ par ADU

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

Caméra CMOS de marque Pixelink, modèle PL-B781F

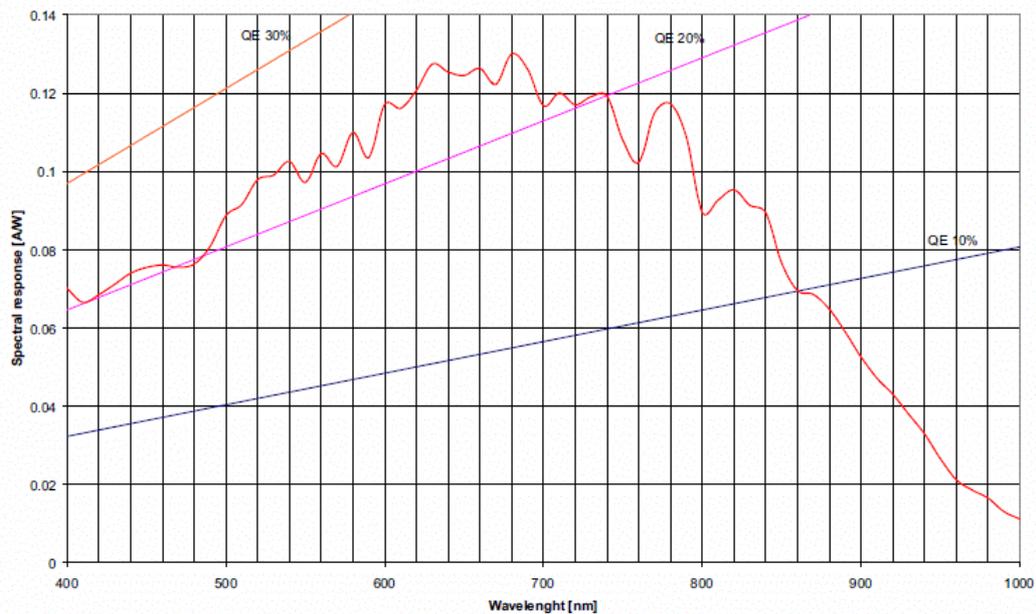
General Specifications

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

Electro Optical Specifications

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

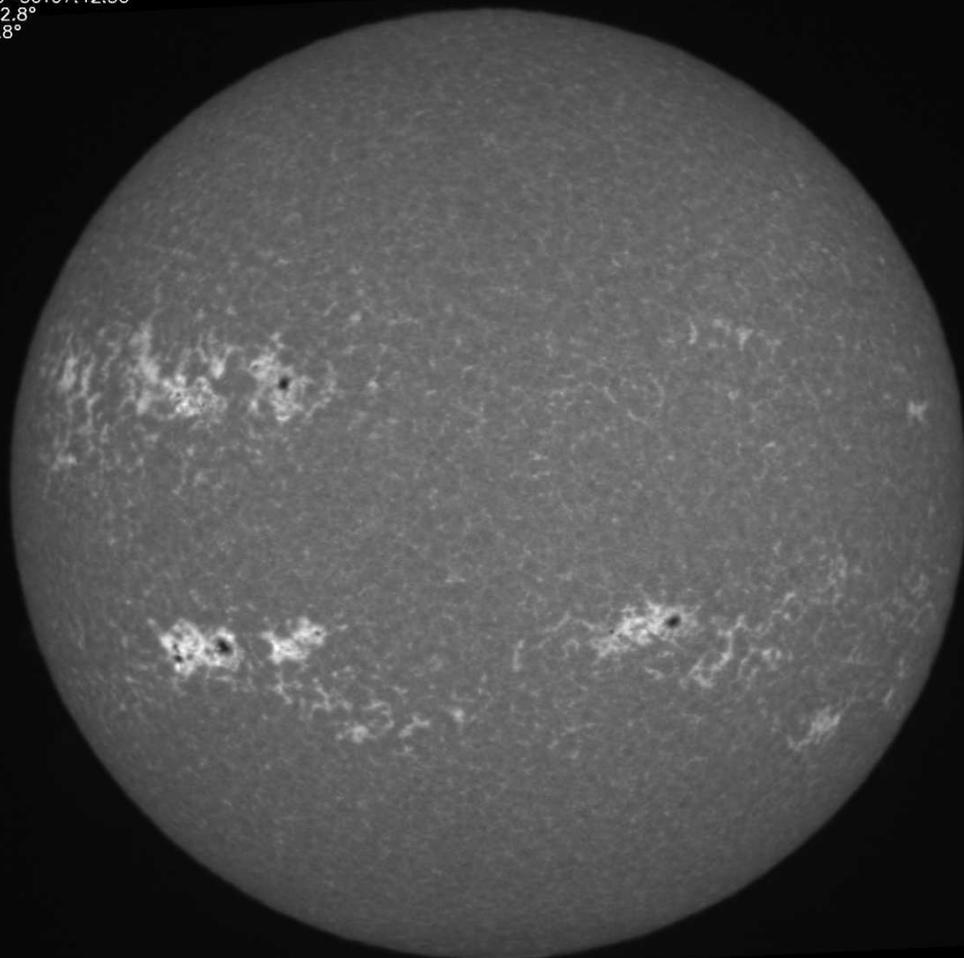
Figure 2. Spectral Response Curve



**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*

VI - Lunette Calcium CaII K PICARD sol/CNES

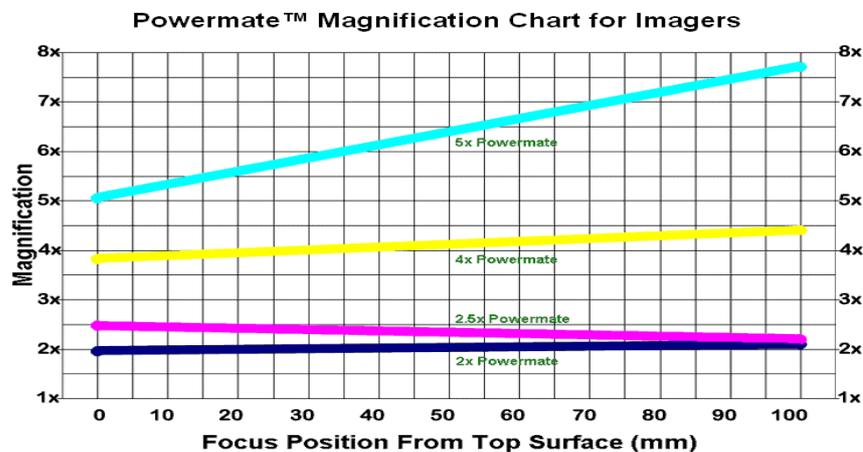


L'objectif de cet instrument est de surveiller l'activité solaire au niveau chromosphérique dans la raie K du Calcium à 393.7 nm (intégration sur le profil au voisinage du coeur de raie)

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).



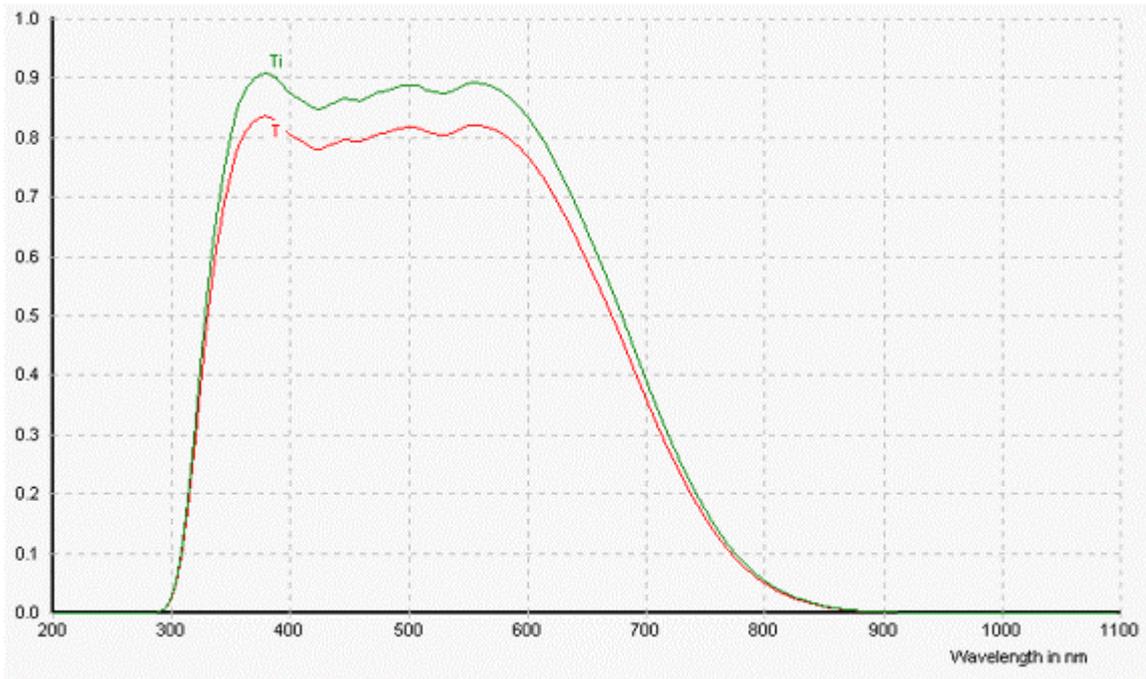
For astro-imagers, the above chart indicates the magnification for each Powermate™ (2x, 2.5x, 4x & 5x) as a function of distance from the Powermate™ top surface to the imaging surface (CCD or film).

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.

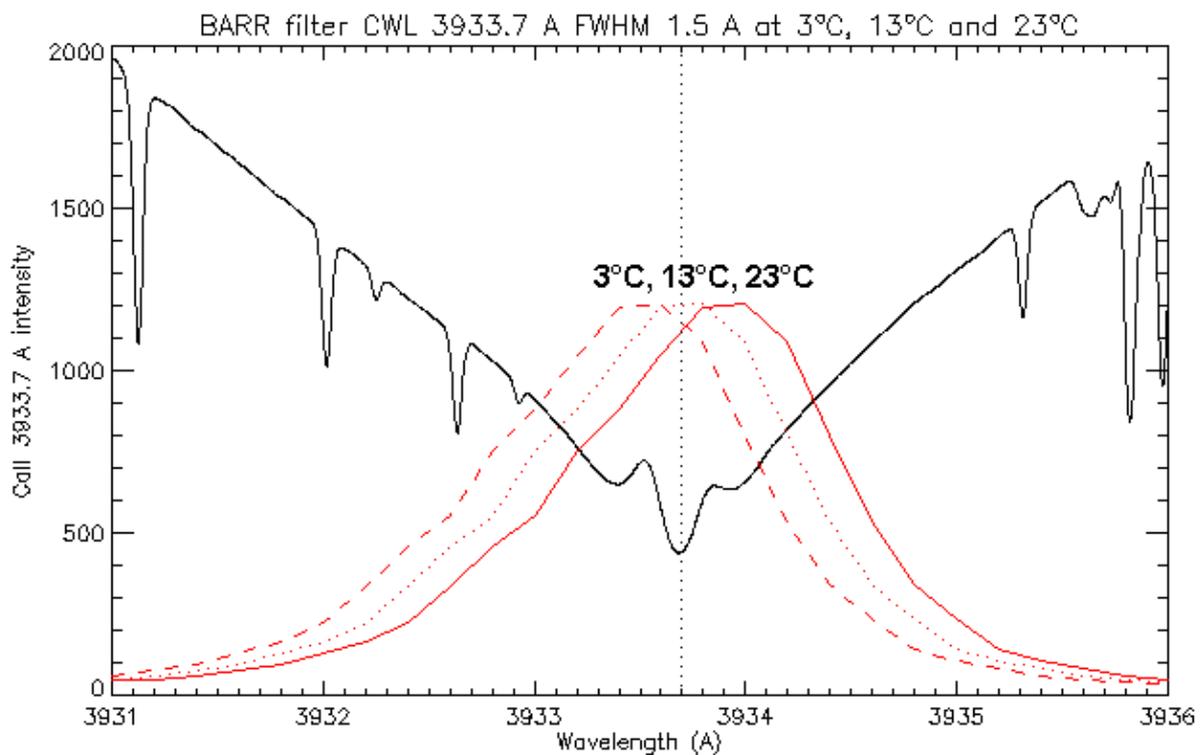
2 - Transmission du filtre anti-calorique KG5 en pleine ouverture



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

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

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



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

P/N: 393.37/0.15nm

Lot#: 2209

| Piece # | 1 | | |
|-----------------|---------------|---------------------|----------|
| CWL_col (nm) | 393.37 | | |
| CWL_1.25° (nm) | 393.36 | | |
| FHWM (nm) | 0.14 | | |
| Peak %T | 59.4 | 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.

6 - Données relatives au capteur et à la caméra

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

Puits de potentiel maximum = 40000 e⁻

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

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

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

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

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

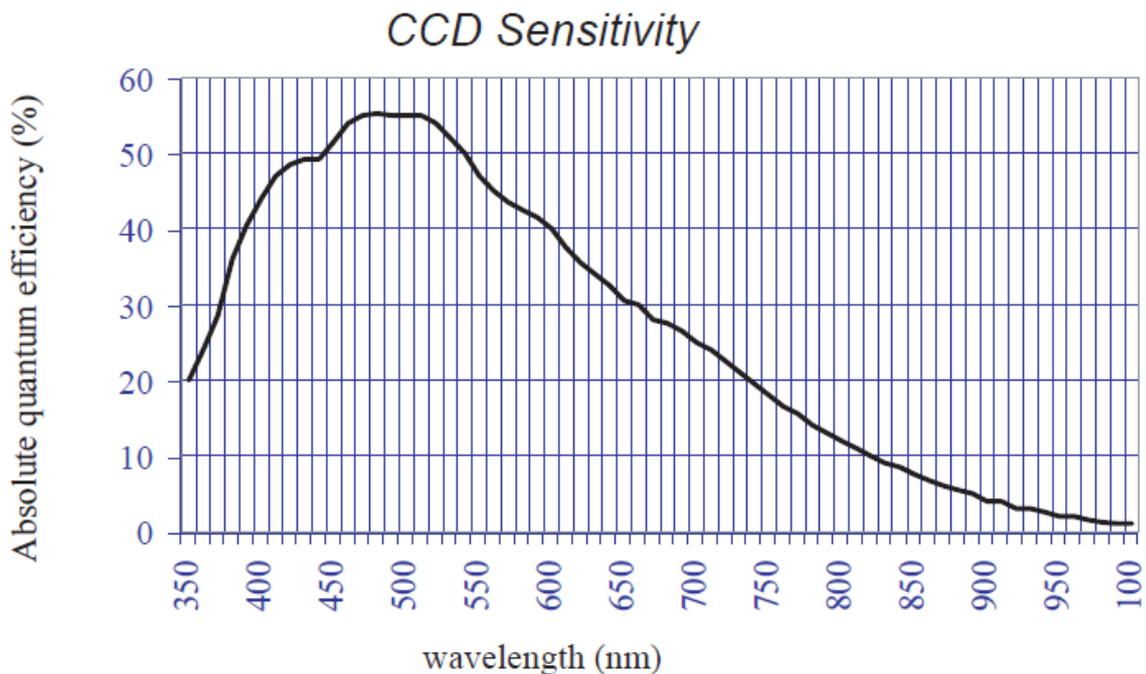
Vitesse de lecture utilisée de 5 MHz

Conversion A/D: 10 e⁻ par ADU

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

Refroidissement par effet Peltier + ventilateur

Caméra CCD de marque APOGEE, modèle U4000

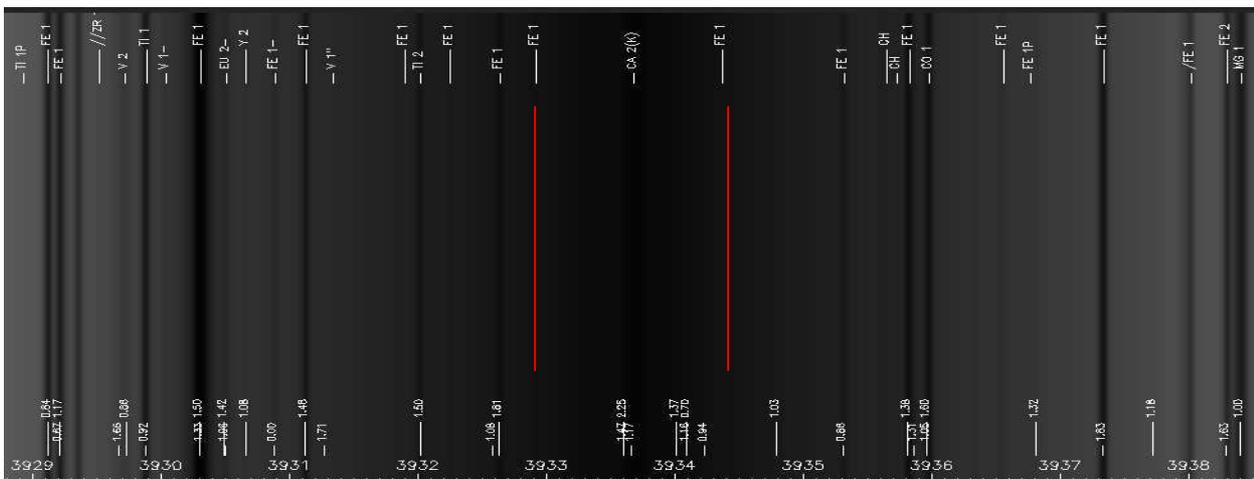


40 % de rendement quantique à 400 nm

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

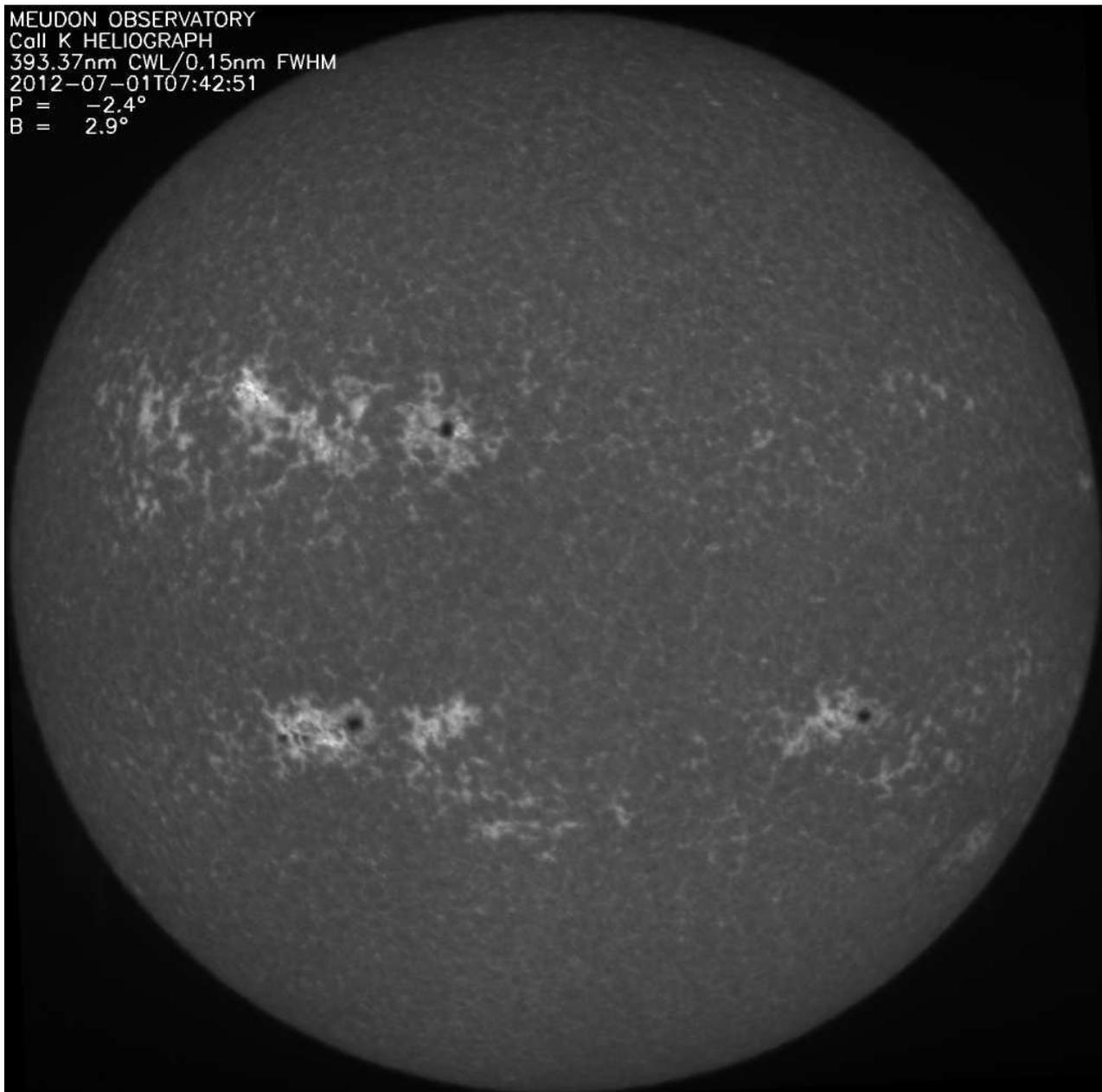
| | |
|------------------------------|---|
| PC Interface | USB 2.0 |
| Max. cable length | 5 meters between hubs; 5 hubs maximum (max. total of 30m) |
| Digital resolution | 12 bits at 5 MHz and 16 bits at 1 MHz |
| System Noise (typ.) | 15 e ⁻ RMS at 10 MHz; 8 e ⁻ RMS at 1 MHz |
| Pixel Binning | 1x1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

Note: cette caméra a été remplacée par une PIXELINK identique à celle de la voie CaII H fin 2012, et la lentille de Barlow a été retirée.



Raie CaII K - Le filtre sélectionne 1.4 A FWHM (bande à mi hauteur indiquée)

MEUDON OBSERVATORY
Cell 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

VII - Lunette continu vert



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

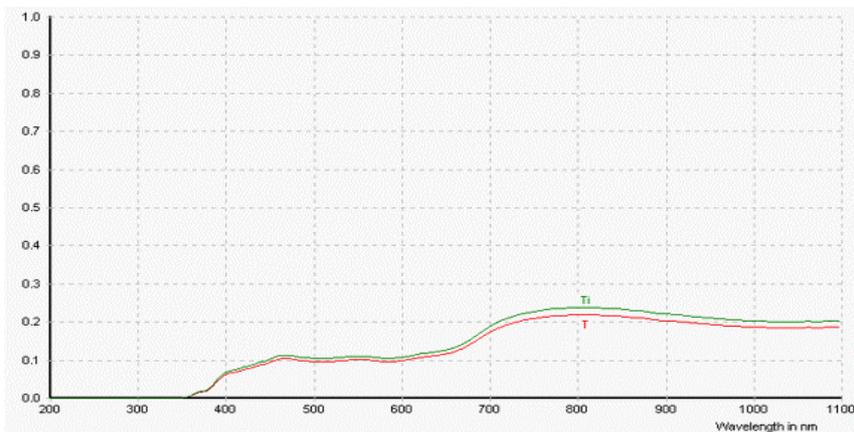
Le premier instrument était un objectif SIGMA de 400 mm de focale avec un multiplicateur x 1.4, donnant une focale $F = 560$ mm avec un filtre Andover Corporation installé en pleine ouverture. L'instrument 2 lui a vite succédé, et nous ne présenterons que cette configuration dans les détails.

2 - Instrument 2

Lunette à deux verres ED (doublet apochromatique) de marque Vixen, modèle ED81SF, $D = 81$ mm, $F = 625$ mm.

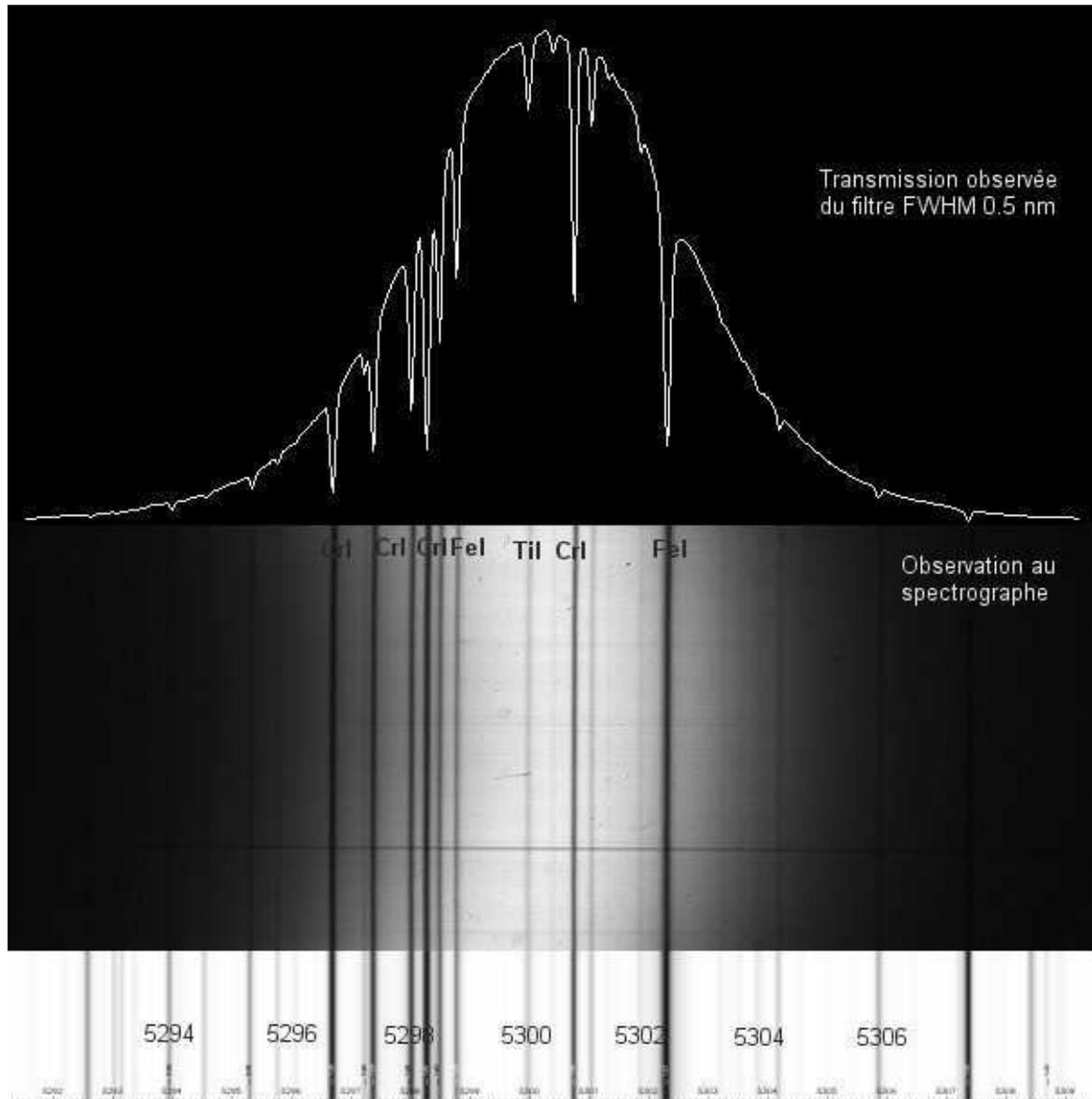
Une densité neutre ND1 carrée 50 x 50 mm est placée devant l'objectif en pleine ouverture et suivie d'un diaphragme de 50 mm de diamètre. Ce diaphragme définit la pupille d'entrée de la lunette. La lunette travaille donc en réalité à $F/12$ (demi angle du cône de lumière = 2.4°).

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

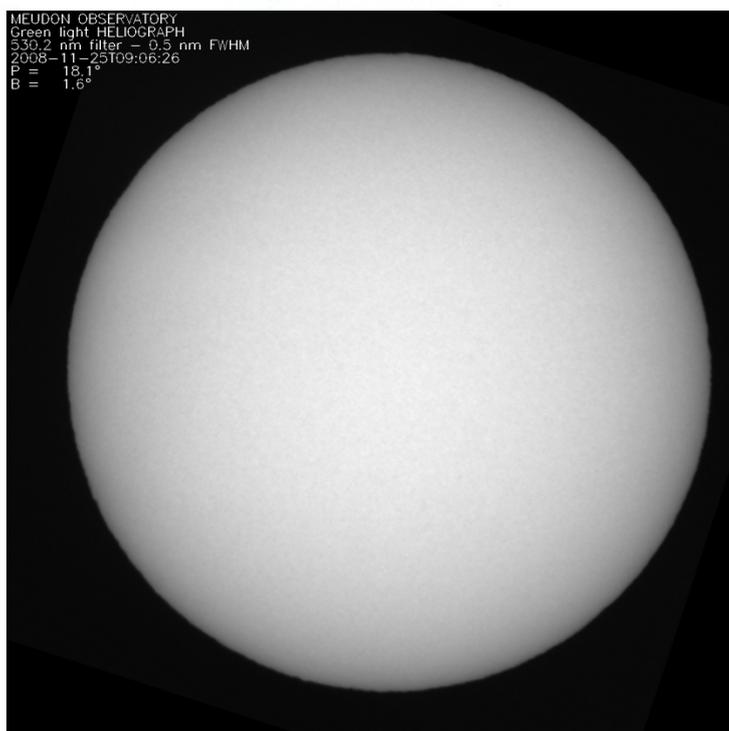
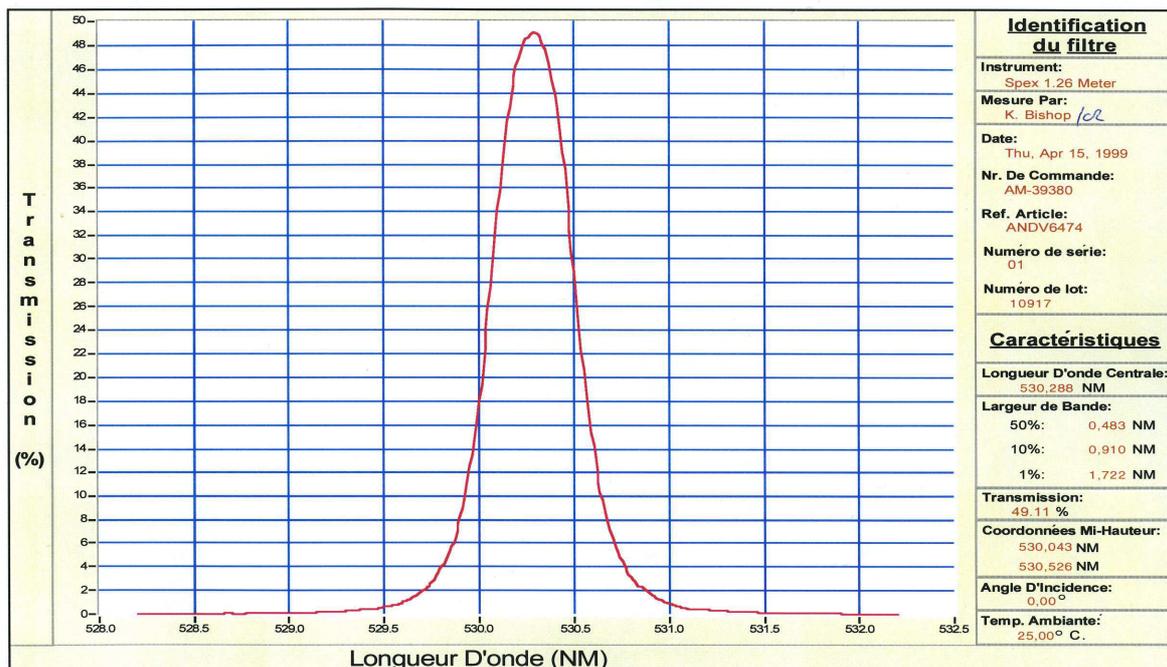
Le soleil mesure en théorie et en moyenne 5.58 mm au foyer de la lunette 2, soit 1594 pixels de 3.5 microns. En hiver (le soleil a un diamètre apparent plus grand en automne/hiver) le calcul théorique donne 5.66 mm soit 1617 pixels. La mesure avec la lunette 1 donne 1470 pixels et avec la lunette 2 donne 1575 pixels, soit **1.25** seconde/pixel pour cette dernière.

6 - Données relatives au capteur :

Capteur CMOS IBIS 6600 de CYPRESS
Puits de potentiel maximum = 21500 e⁻
A mi saturation, on a 10000 e⁻ par pixel environ

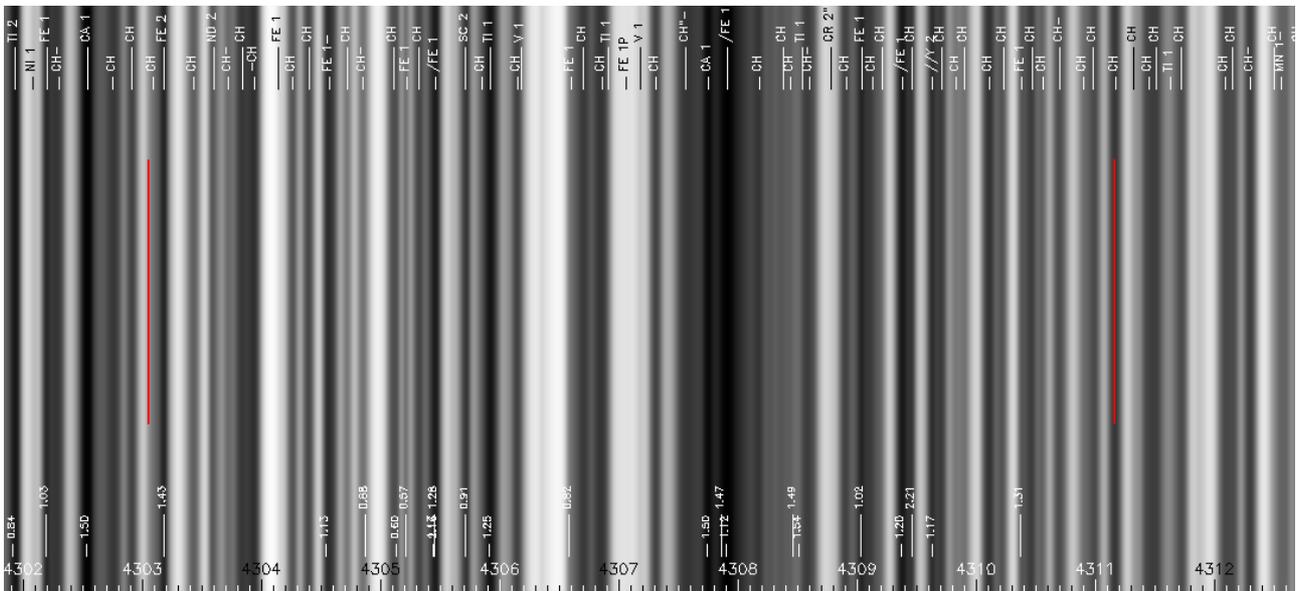
Bruit de lecture $24 e^-$, bruit de photons à mi saturation voisin de $100 e^-$
 Bruit global = $(24^2 + 100^2)^{1/2} = 103 e^-$ à mi saturation
 Rapport signal/bruit voisin de 100 à mi saturation soit 1% de bruit dans le signal
 Dynamique $21500/24 = 900$ (10 bits = 1024 niveaux)
 Conversion A/D: $21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

L.O.T. - Oriel



*Exemple
d'image
obtenue
avec la
lunette*

VIII - Lunette Bande G



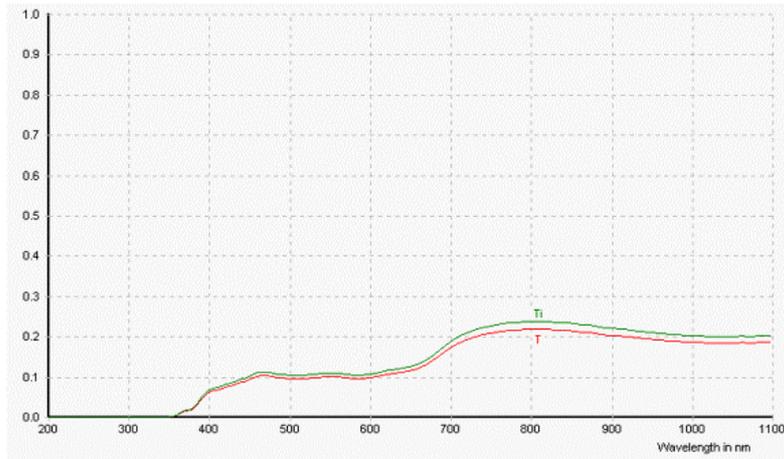
La lunette a pour but de surveiller l'activité solaire au niveau photosphérique dans la bande moléculaire de la molécule CH, baptisée G, autour de 430.7 nm (intégration sur un grand nombre de raies, voir spectre ci dessus, sur une largeur de 8 Å à mi hauteur indiquée par les bornes rouges)

1 - Instrument

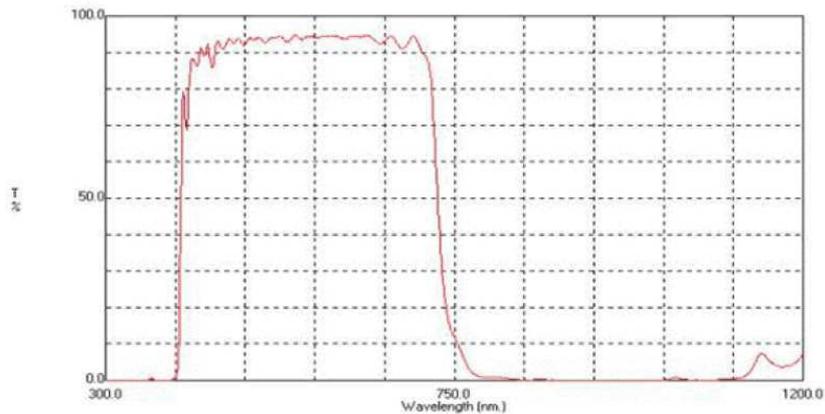
Lunette à deux verres ED (doublet apochromatique) de marque Vixen, modèle ED81SF, $D = 81$ mm, $F = 625$ mm. Une densité neutre ND1 carrée 50 x 50 mm est placée devant l'objectif en pleine ouverture et suivie d'un diaphragme de 50 mm de diamètre. Ce diaphragme définit la pupille d'entrée de la lunette. 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 faible de 0.1 Å environ par $^\circ\text{C}$ de la bande passante.

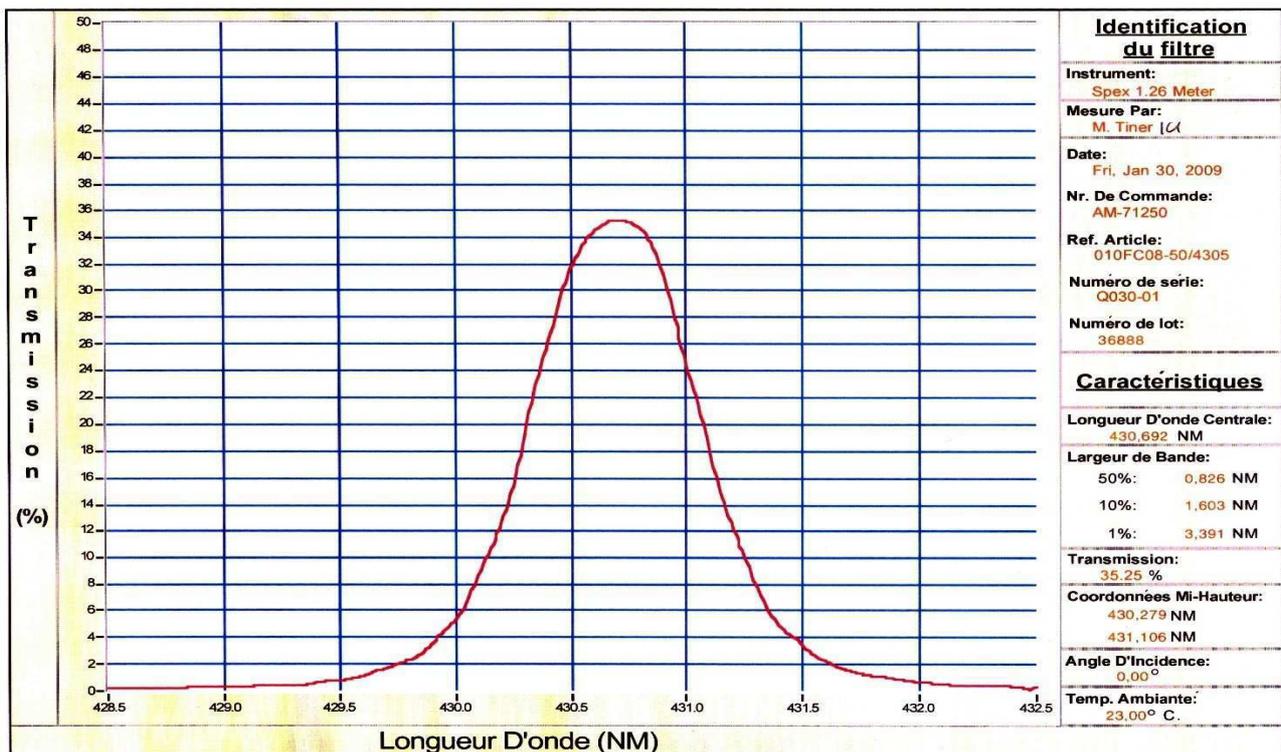
2 - Transmission de la densité neutre en pleine ouverture SCHOTT



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.

7 - Données relatives au capteur et à la caméra

Capteur CMOS IBIS 6600 de CYPRESS

Puits de potentiel maximum = 21500 e⁻

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

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

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

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

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

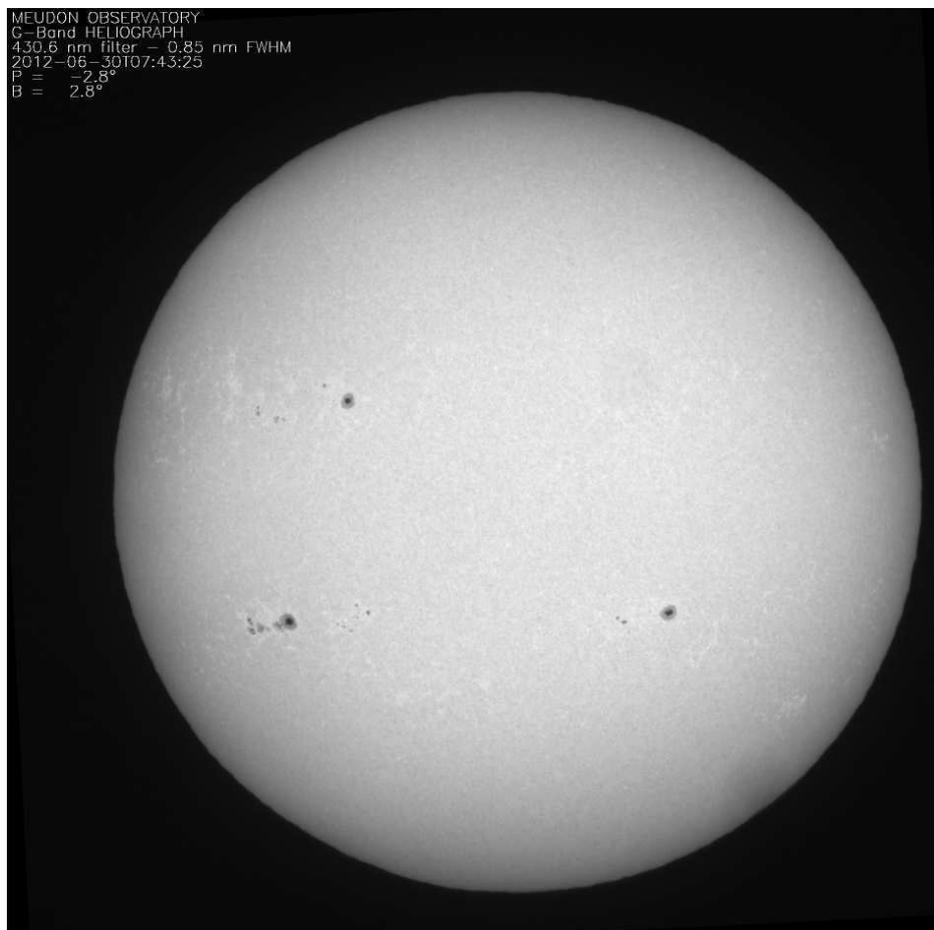
Conversion A/D: 21 e⁻ par ADU

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

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

Spécifications et caractéristiques identiques à celles de la voie CaII H.

*Exemple
d'image
produite
en bande
G*



IX - Lunette Calcium CaII K de réserve

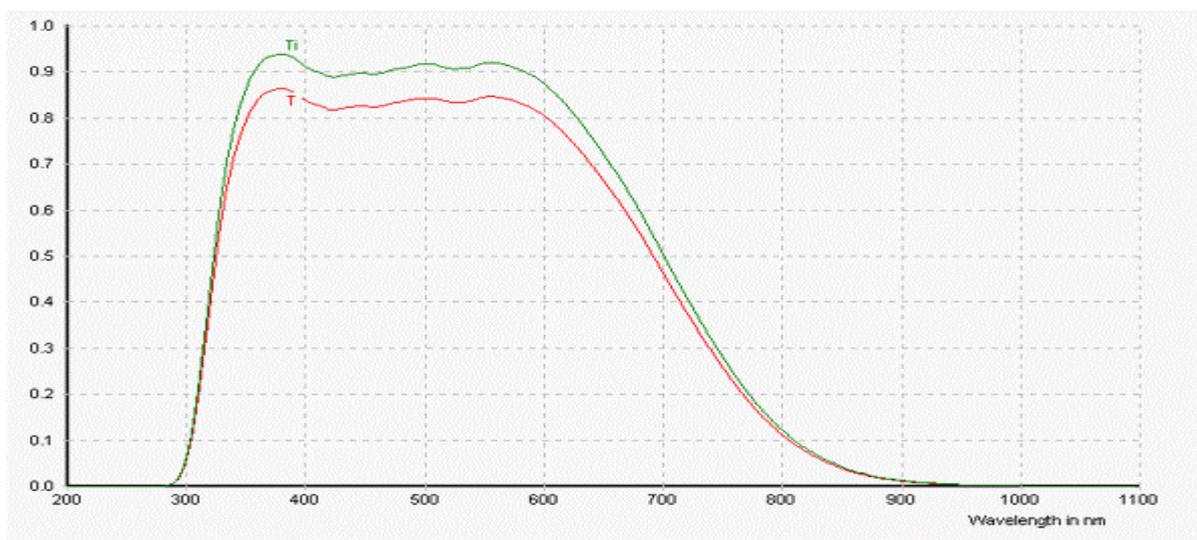


Le but de cette lunette de secours est de surveiller l'activité solaire au niveau chromosphérique dans la raie K du Calcium à 393.37 nm (intégration sur le profil au voisinage du coeur de raie).

1 - Instrument

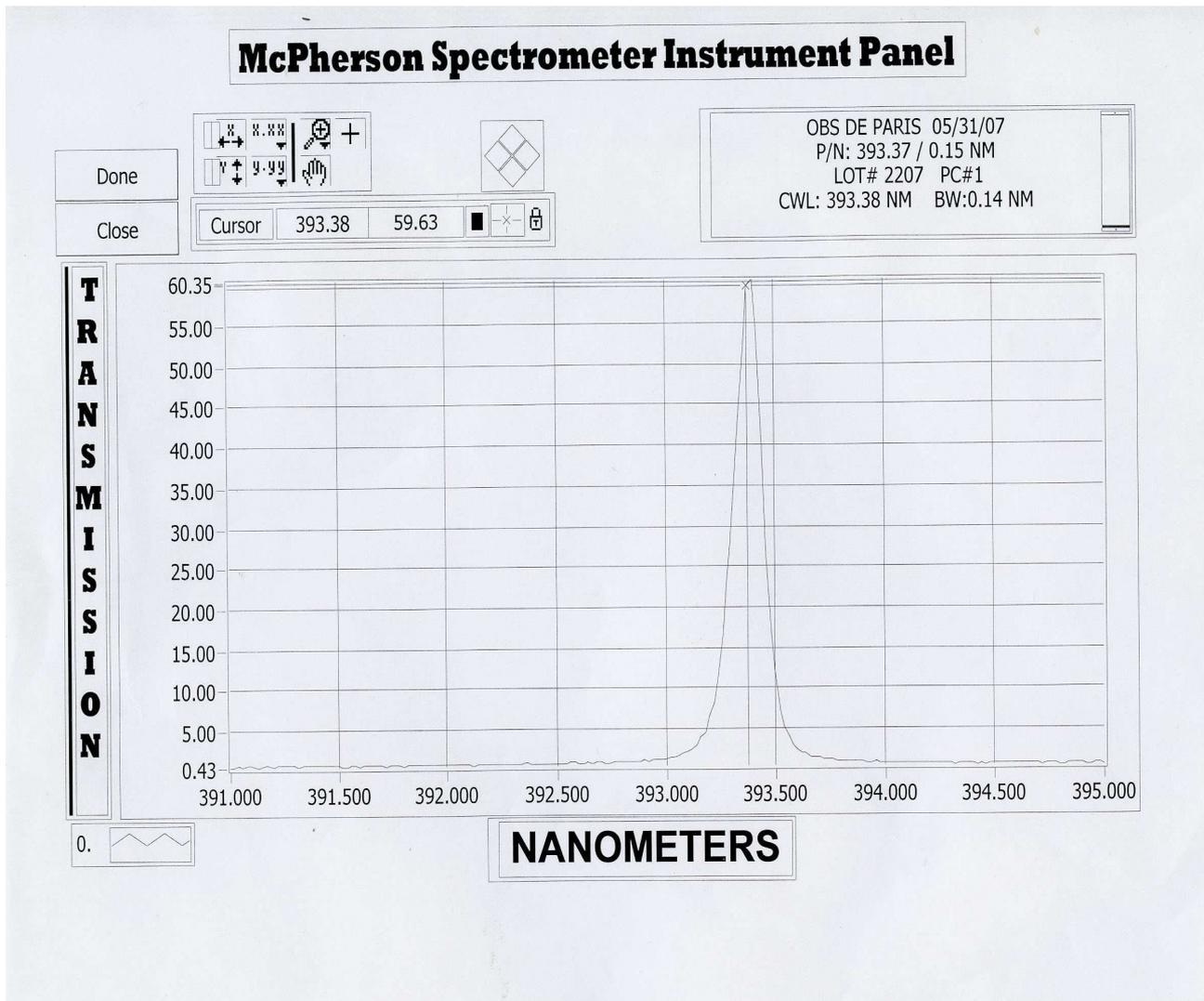
Lunette de marque SkyWatcher, modèle Equinox 80 ED, $D = 80$ mm, $F = 500$ mm. Un filtre anti calorique KG3 d'un diamètre de 50 mm placé devant l'objectif définit la pupille de la lunette. Le faisceau est replié par un renvoi coudé à miroir plan puis traverse un filtre Barr Associates centré sur la raie K avec une bande passante de 1.4 \AA à mi-hauteur. Le filtre mesure 25 mm de diamètre. Ce filtre est centré correctement pour la température de 23°C . Le constructeur donne une dérive très faible de 0.02 \AA par $^\circ\text{C}$.

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



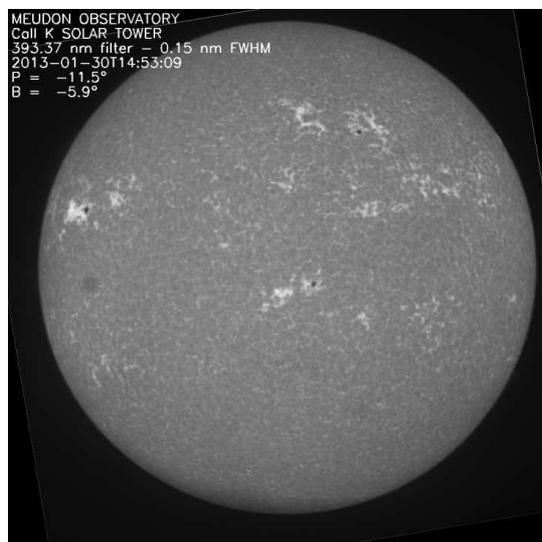
Le filtre coupe l'IR à partir de 800 nm (transmission < 10 %)

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



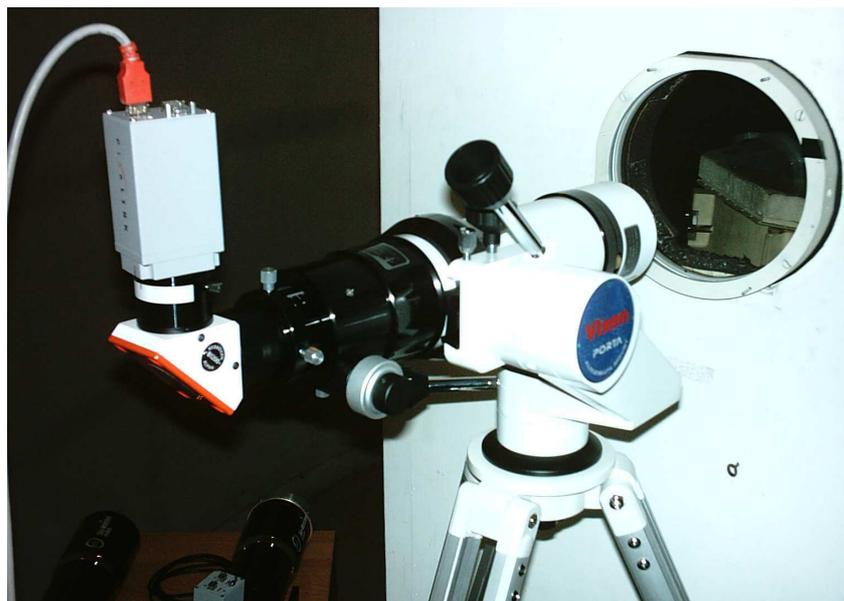
4 - Résolution spatiale

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



*exemple
d'image
obtenue
avec la
lunette*

X - Lunettes H α de réserve



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

1 - Instrument LUNT

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

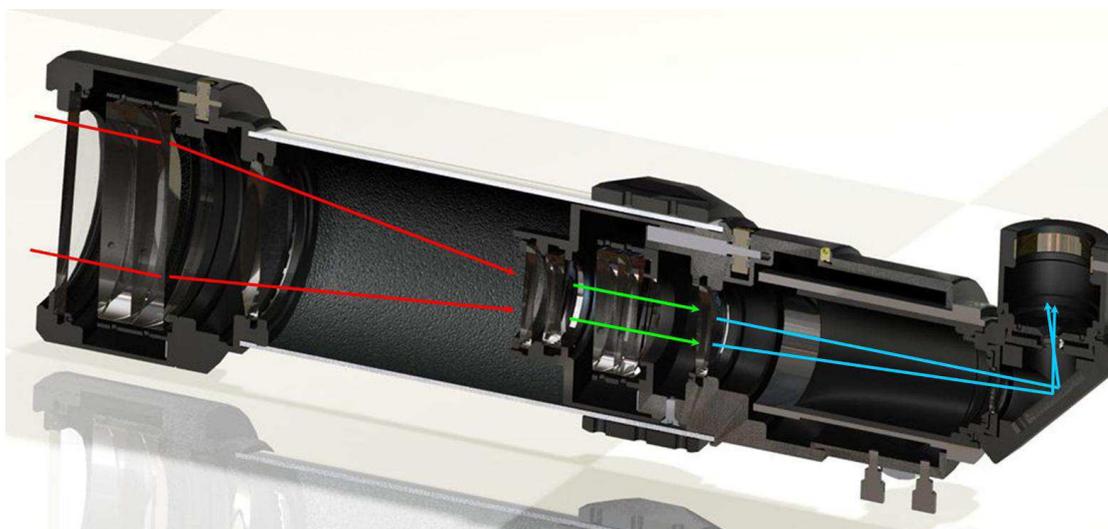
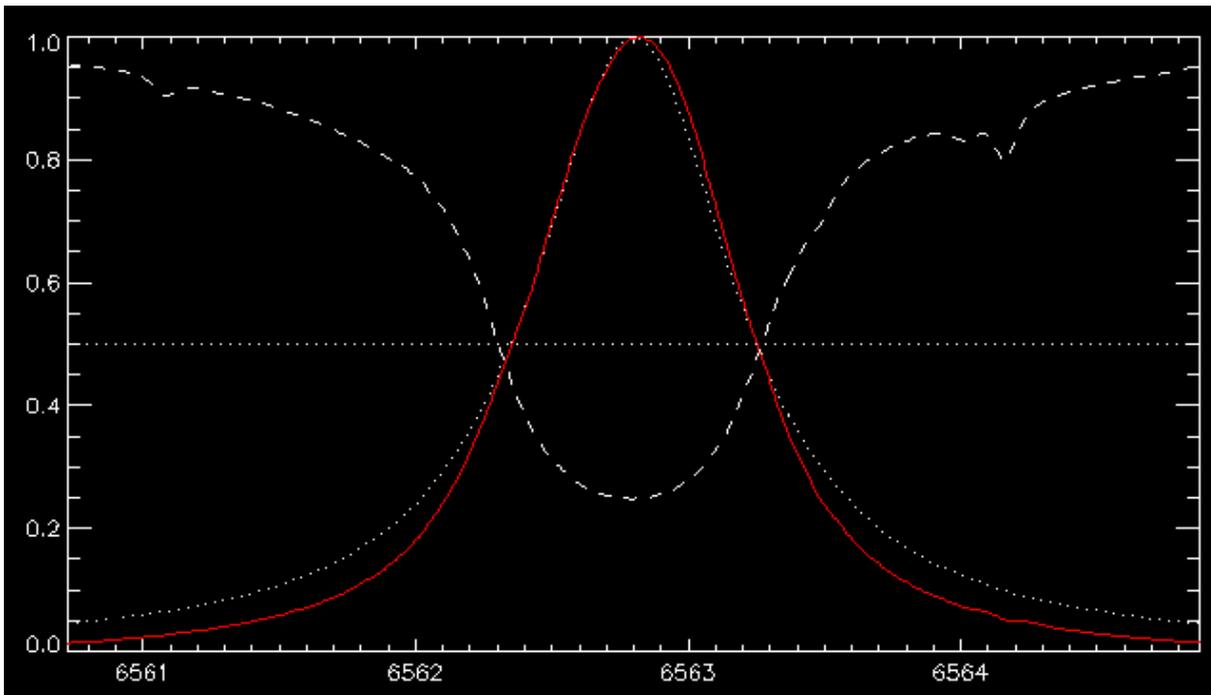


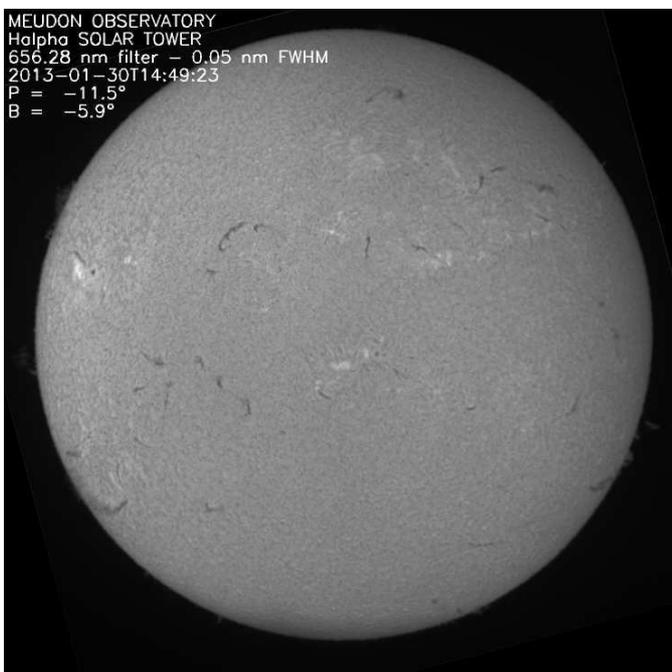
Image de la société Lunt



ETAGE EN PLEINE OUVERTURE
Tirets ----- : raie H alpha observée à la Tour
Pointillés : Fabry Pèrot théorique R = 0.9, largeur 0.9 Å
Rouge continu — : filtre Lunt étage en pleine ouverture
ETAGE INTERNE ET PREFILTRE NON TESTES

2 - Résolution spatiale

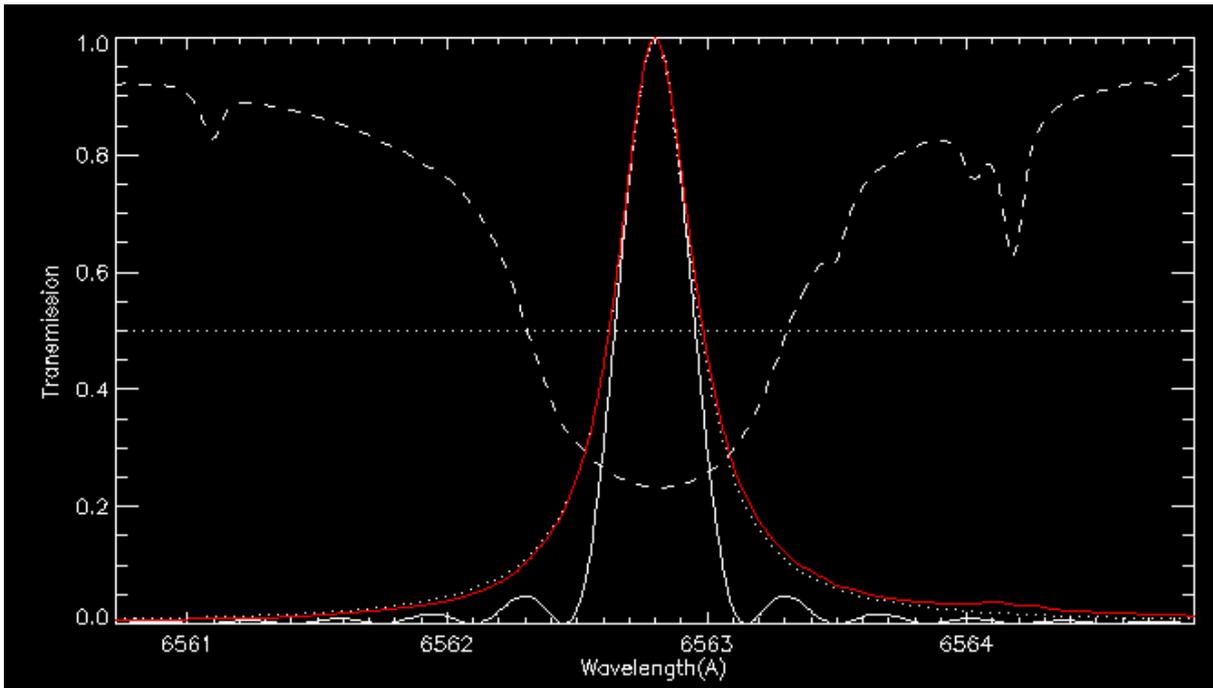
La résolution théorique est de 3 secondes d'arc.



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

2 - Filtre DAYSTAR FILTERS FWHM 0.3 Angströms à F/30

Filtre financement programme européen SOTERIA, présente un défaut, en réparation aux USA. Ce filtre est conçu pour travailler à F/30 en plan pupille. Il doit être installé en afocal.

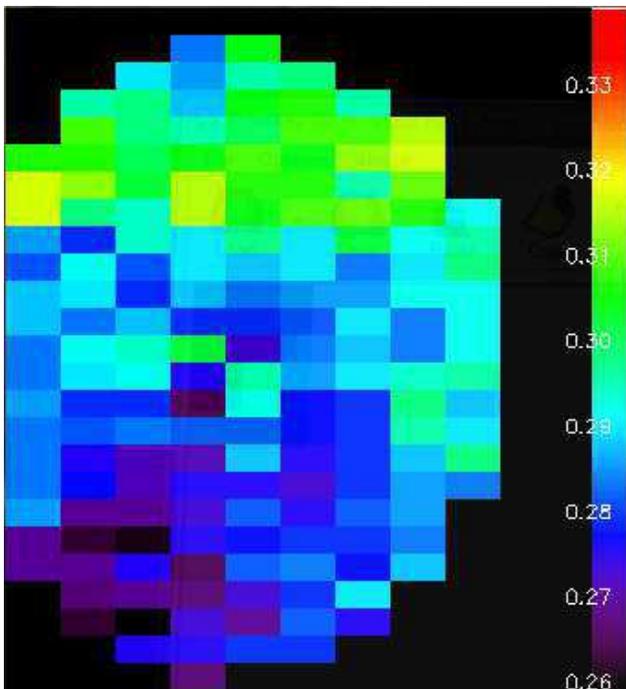


Tirets ----- : raie H alpha observée à la Tour

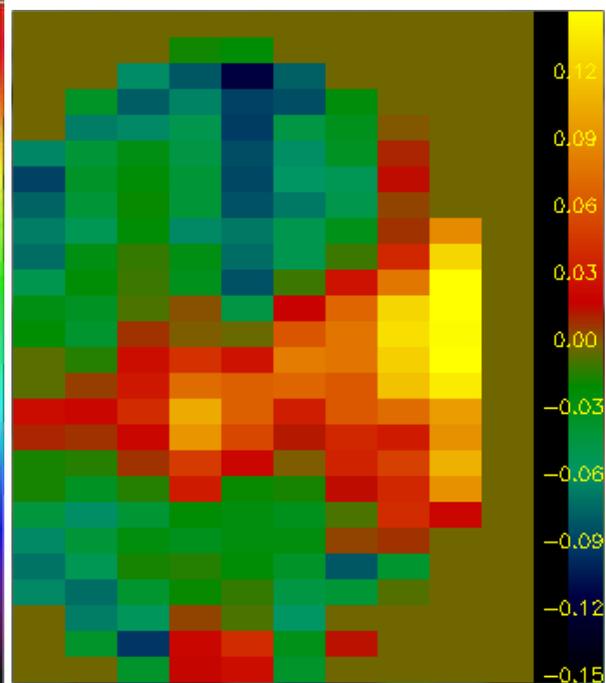
Pointillés : Fabry Pèrot théorique $R = 0.9$, largeur 0.35 \AA

Rouge continu — : filtre DayStar en intégration pupillaire (le profil de transmission du filtre est parfaitement lorentzien, ce résultat est remarquable)

blanc continu — : Filtre de LYOT à 5 étages (on remarque la supériorité des filtres de LYOT dans les ailes sur le Fabry Pèrot, c'est un filtre plus sélectif)

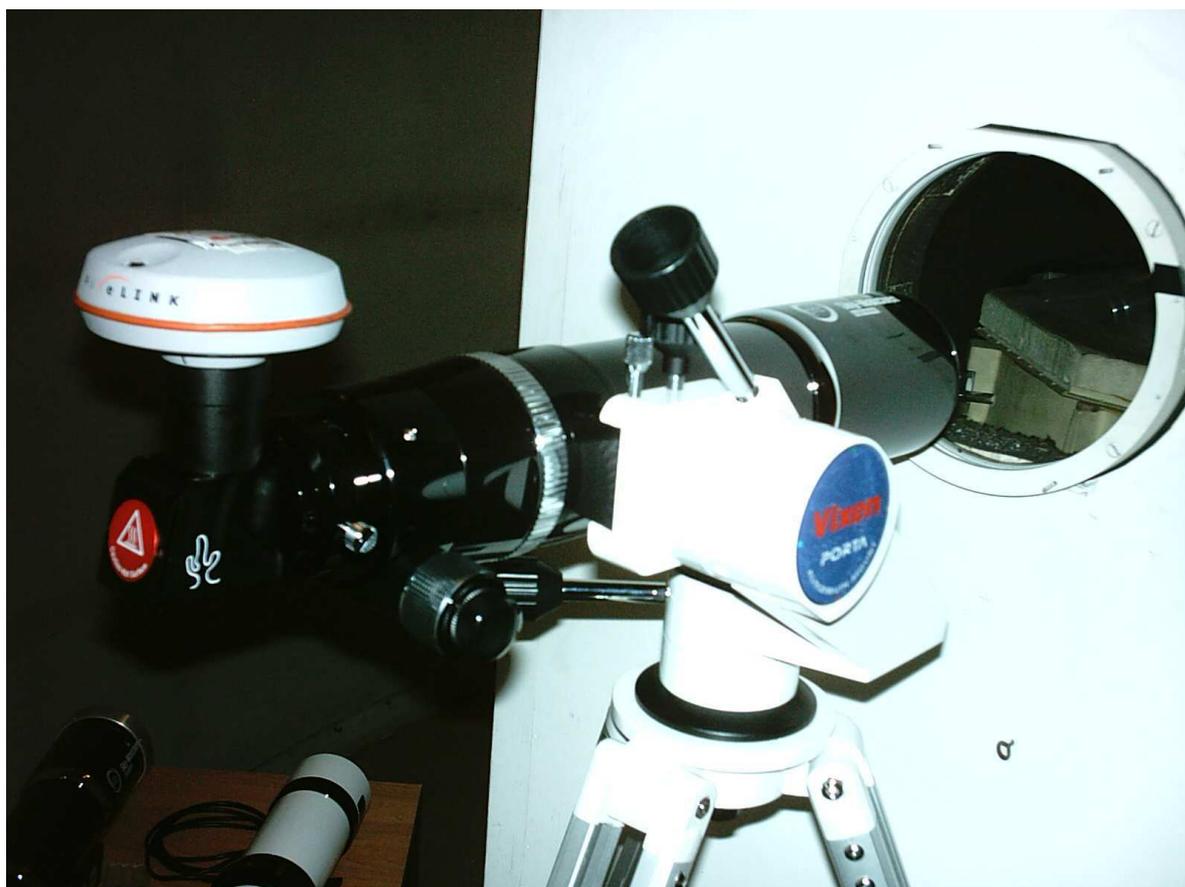


Cartographie 2D de largeur à mi hauteur (FWHM) de la pupille (échelle en Angströms)



Cartographie 2D de centrage en longueur d'onde CWL de la pupille (échelle en Angströms)

XI - Lunette Baader continuum H K 395 nm de réserve



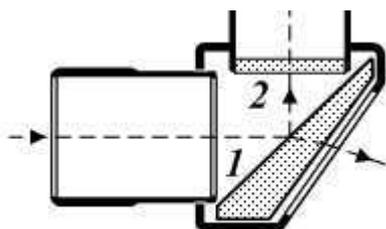
La fonction de cet instrument est de surveiller l'activité solaire au niveau photosphérique dans un large domaine spectral incluant les raies H et K du calcium ainsi que le continuum entre les raies.

1 - Instrument

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

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

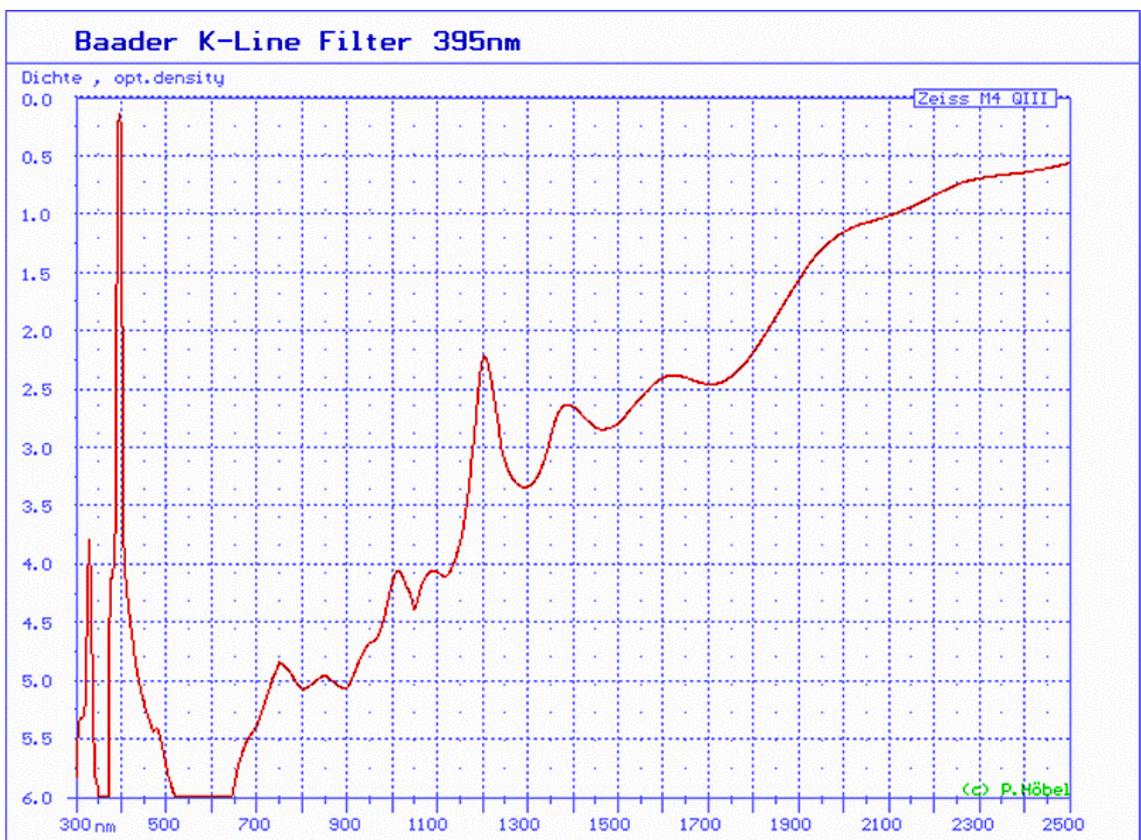
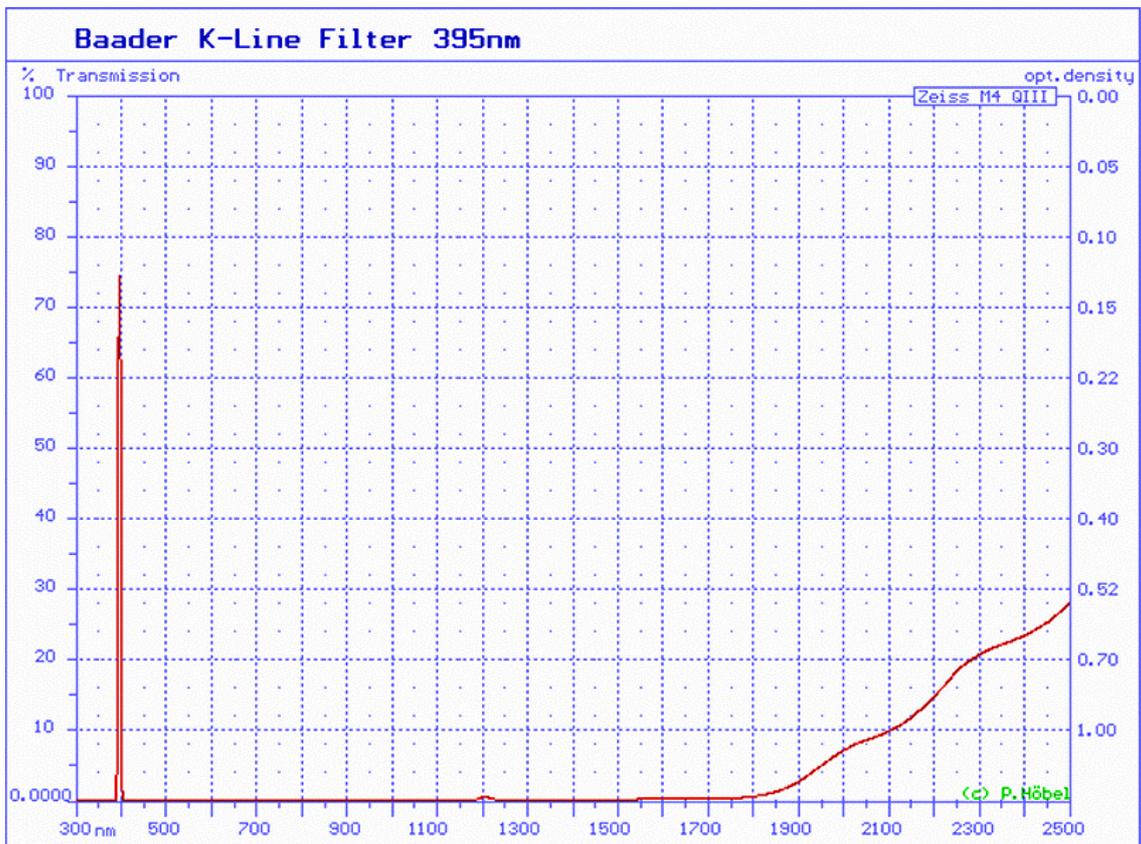
La caméra est munie d'une bague en 31.75 mm sur laquelle est vissé un filtre "Baader K-line".

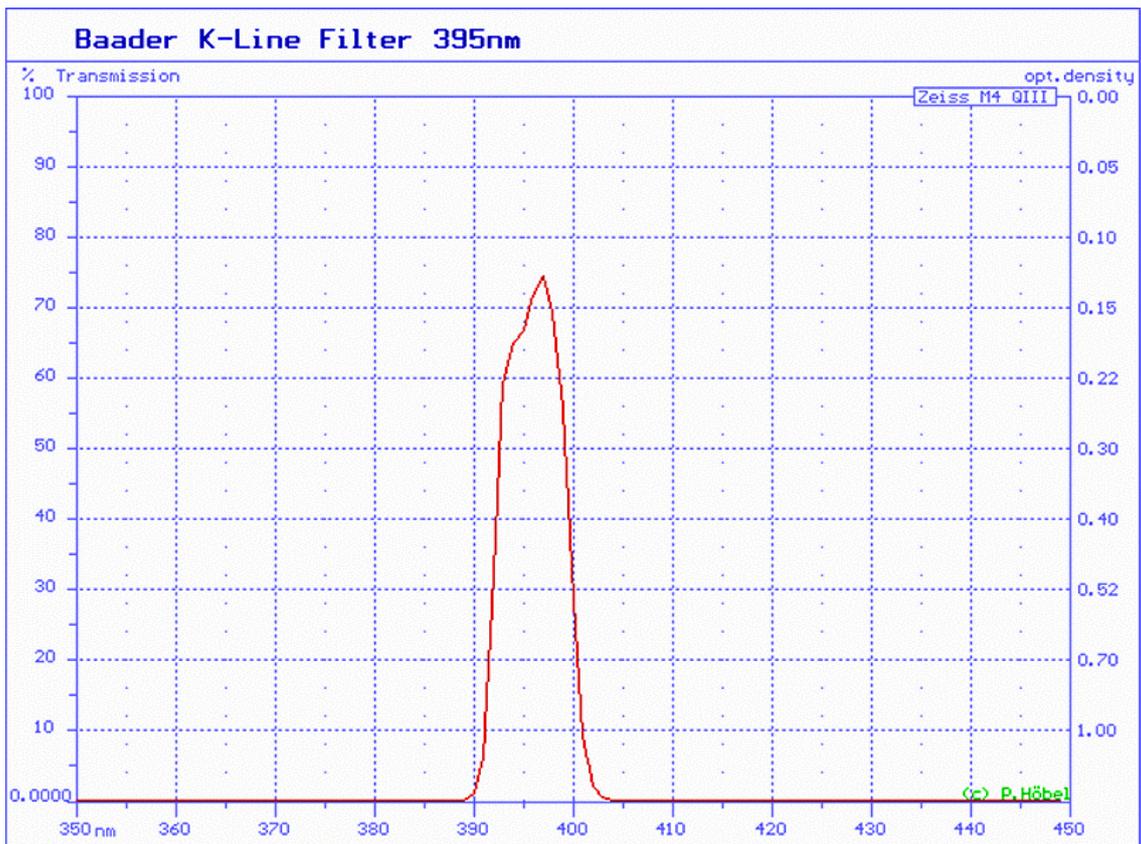


Hélioscope de Hershell:

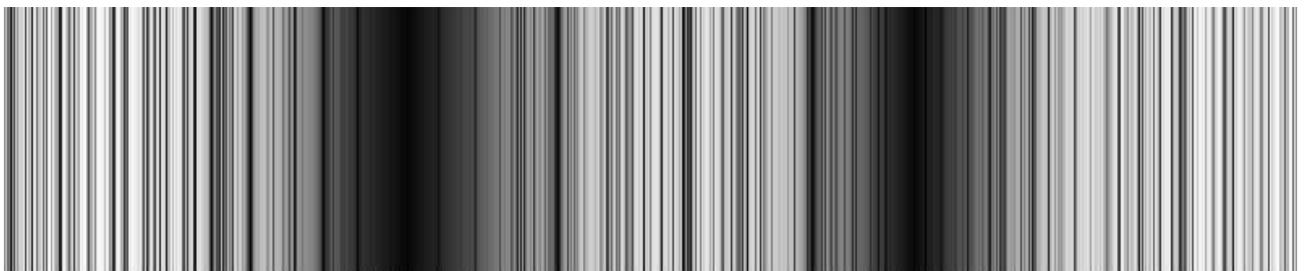
1 = lame prismatique
2 = densité neutre

2 - Courbes de transmission du filtre Baader K-Line





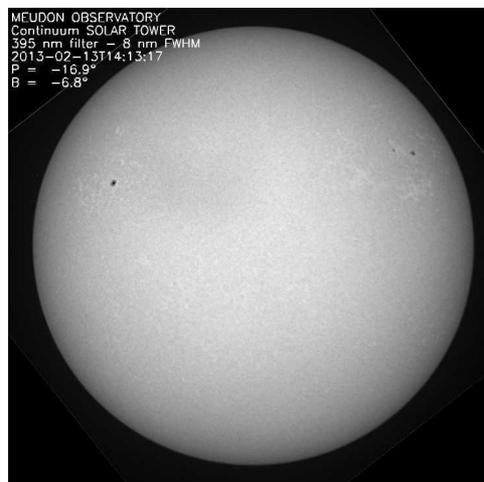
Largeur du filtre à mi hauteur: 80 Angströms (les raies H et K sont dans la bande passante)



Domaine spectral approximativement visible au travers du filtre

3 - Résolution spatiale

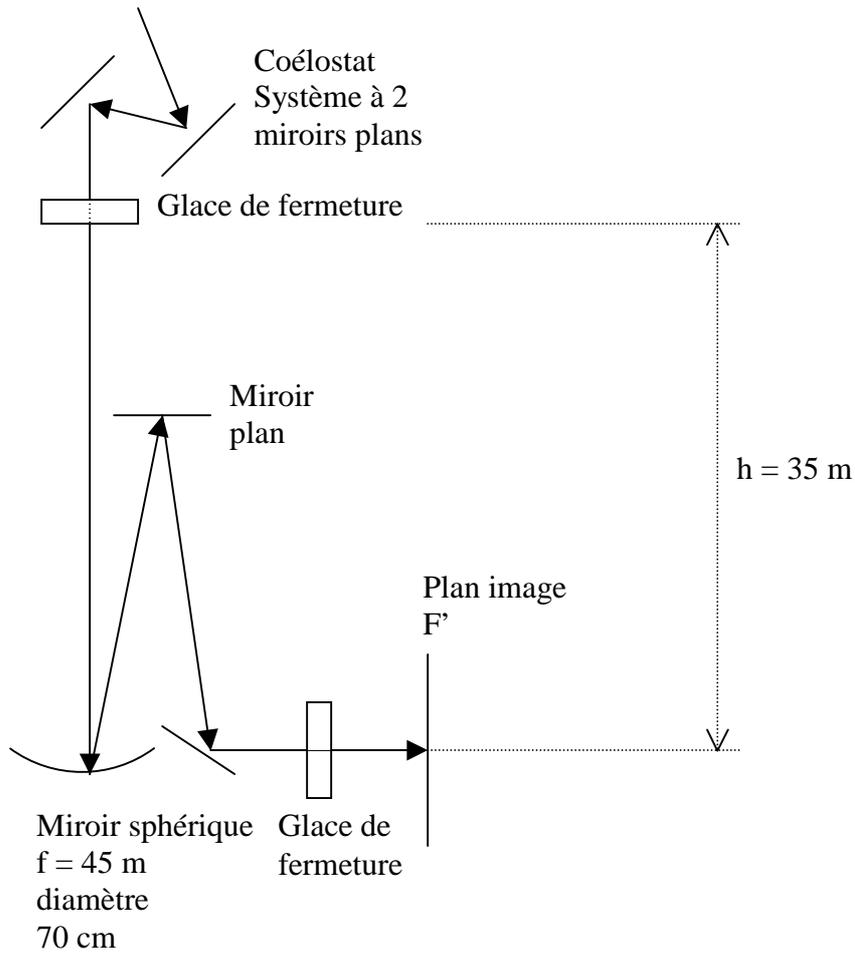
La résolution théorique est de 2 secondes d'arc avec un diaphragme de 50 mm.



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

XII - SPECTROGRAPHE TOUR SOLAIRE EN SIMPLE PASSAGE

1 - Tour solaire de Meudon : le télescope



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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

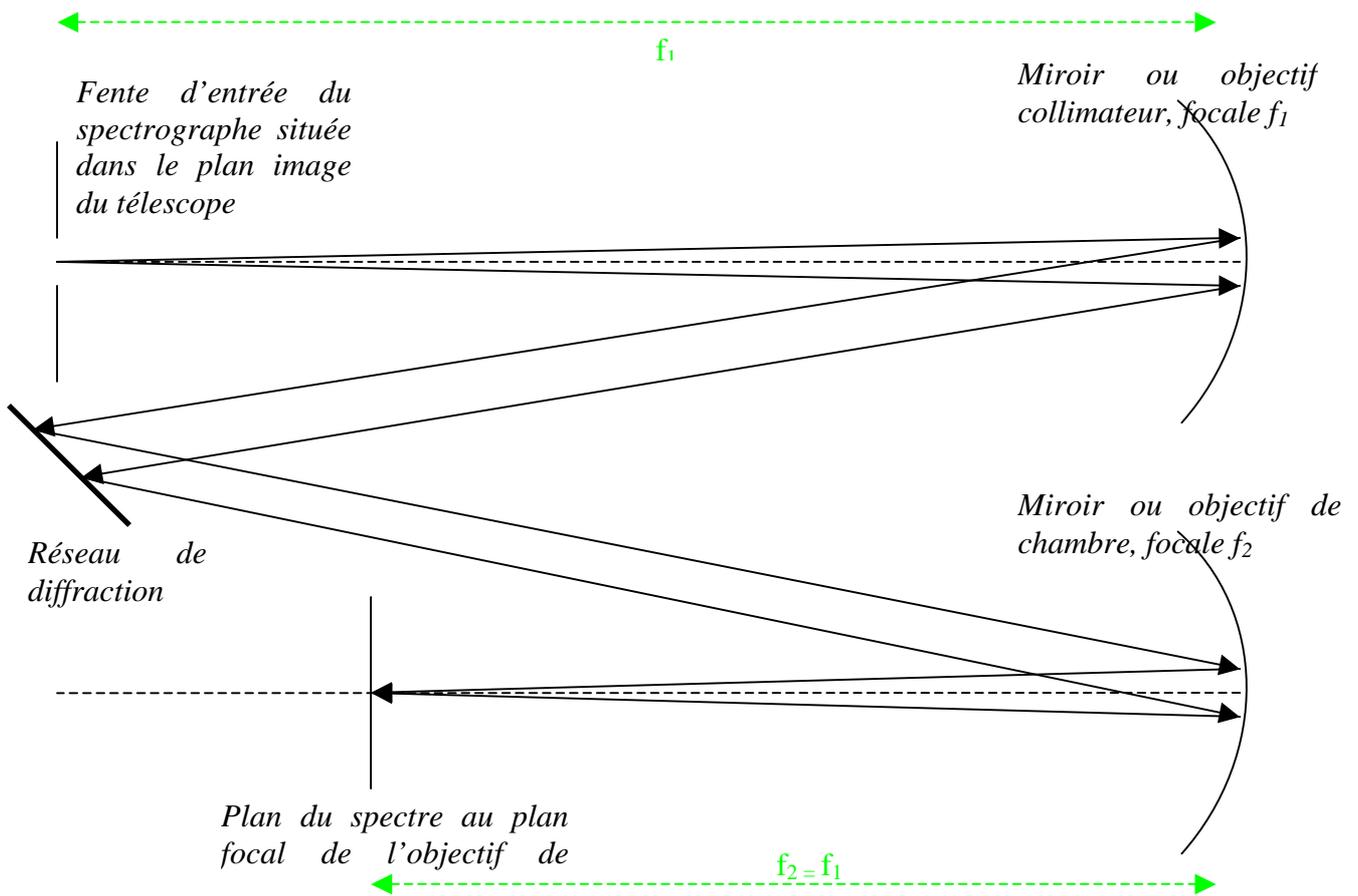
2 - le spectrographe en simple passage : caractéristiques

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

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

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

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



2) quelle est sa dimension sur le réseau ?

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



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

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

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

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

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

dispersion $dx / d\lambda = k f / (d \cos b)$ avec $f = 14 \text{ m}$, $d = 1/300 \text{ mm}$, $b = 63^\circ 26'$
 $k = 13$ donne $dx / d\lambda = 12.2 \text{ mm/\AA}$ dans le bleu ($\lambda = 4586 \text{ \AA}$)
 $k = 9$ donne $dx / d\lambda = 8.5 \text{ mm/\AA}$ dans le rouge ($\lambda = 6625 \text{ \AA}$)

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

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

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

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

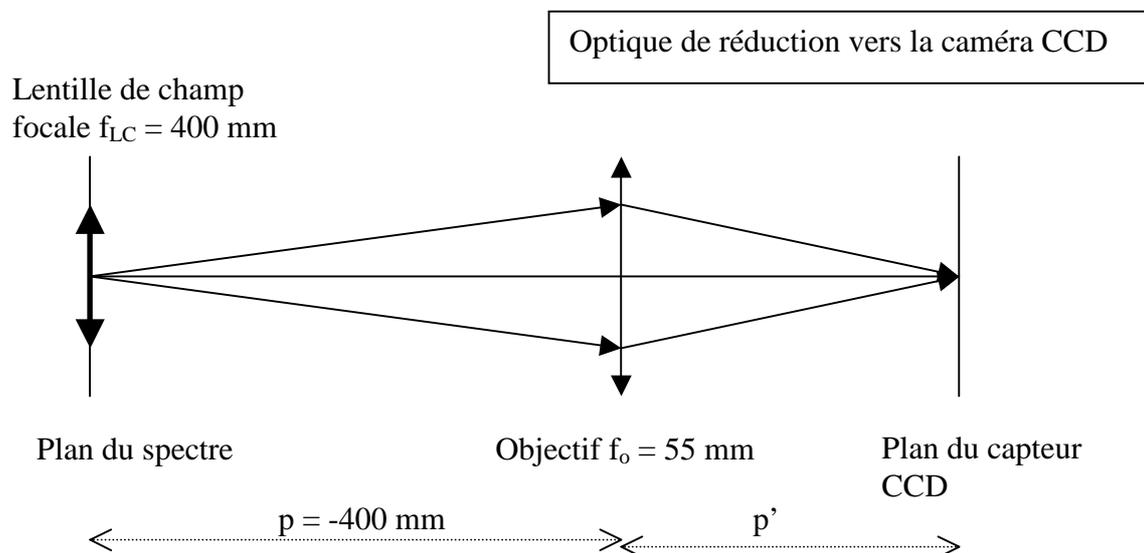
$k = 9$ donne $\Delta\lambda = 26 \text{ m\AA}$ dans le rouge ($\lambda = 6625 \text{ \AA}$)

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

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

3 - le spectrographe en simple passage : sortie caméra CCD

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



6) rôle de la lentille de champ

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

7) rapport de réduction du spectre ainsi obtenu

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

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

bleu : la dispersion $12.2 \text{ mm}/\text{\AA}$ devient $1.95 \text{ mm}/\text{\AA}$ sur le détecteur ($k = 13$, réduction 0.16)
 dans le rouge : la dispersion $8.5 \text{ mm}/\text{\AA}$ devient $1.35 \text{ mm}/\text{\AA}$ sur le détecteur ($k = 9$, réduction 0.16)
 le détecteur possède un pixel binné 2x2 de 12.9μ . On en déduit la valeur du pixel spectral :

1 pixel = $12.9 \mu = 6.6 \text{ m\AA}$ dans le bleu ($k = 13$)

1 pixel = $12.9 \mu = 9.6 \text{ m\AA}$ dans le rouge ($k = 9$)

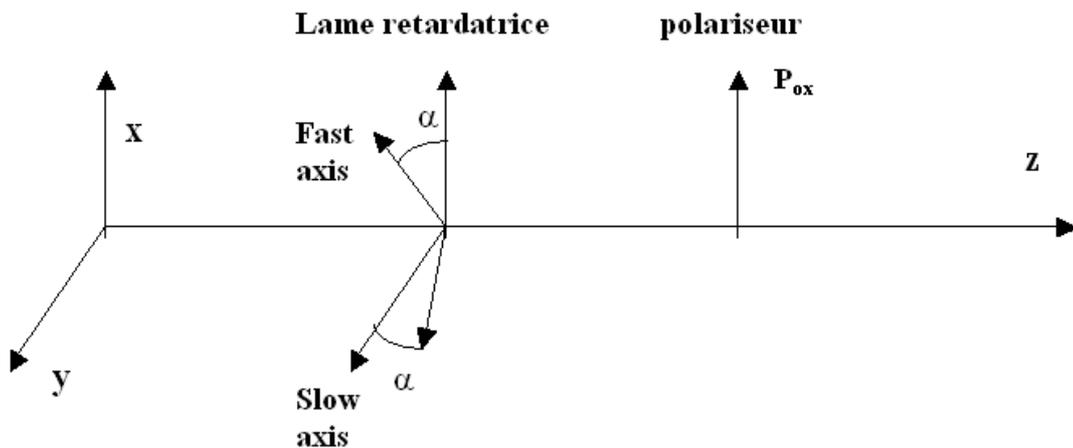
Le pixel spatial se calcule sachant qu'une seconde d'arc représente $217 \mu \times 0.16 = 34.5 \mu$ après la réduction de facteur 0.16. Du coup, 1 pixel = $12.9 \mu = 12.9/34.5'' = 0.37''$ environ

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

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

4 - le polarimètre à cristal liquide

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



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

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

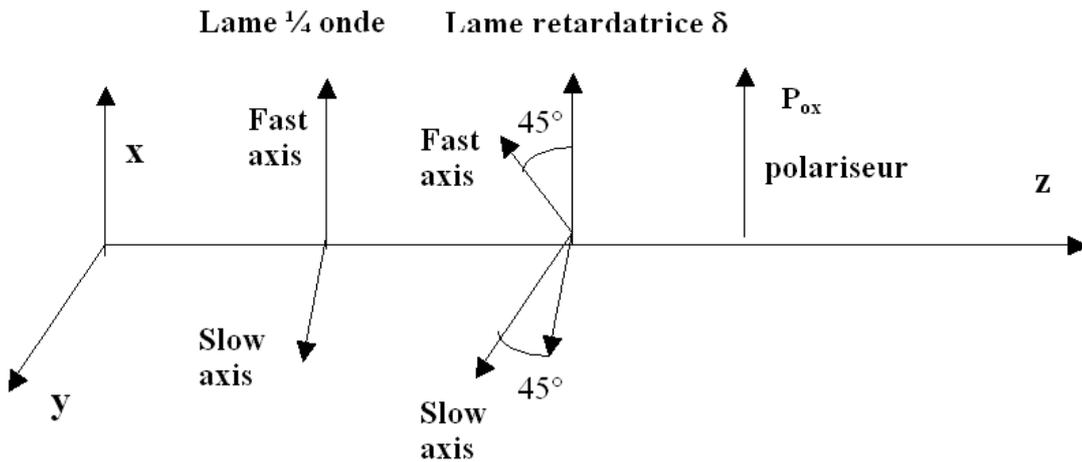
| | | | |
|---|----------------|---|-----------------|
| 1 | $\cos(\delta)$ | 0 | $-\sin(\delta)$ |
| 1 | $\cos(\delta)$ | 0 | $-\sin(\delta)$ |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 |

x 1/2

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

- 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 $\delta = 3\pi/2$, $I_4 = \frac{1}{2} [I_{in} + V_{in}]$

Pour mesurer U_{in} on peut placer devant la lame à retard variable δ d'azimuth $\pi/4$ une autre lame quart d'onde (retard $\pi/2$) d'azimuth nul (d'axes parallèles à ox et oy), selon la figure ci dessous :



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

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

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

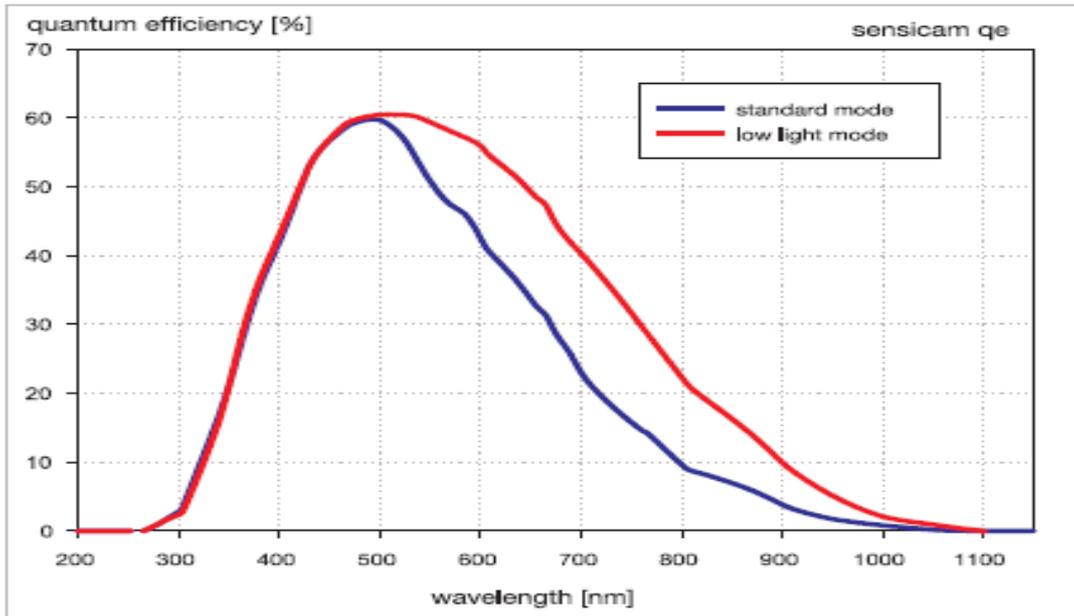
- Pour $\delta = 0$, $I_1 = \frac{1}{2} [I_{in} + Q_{in}]$
- Pour $\delta = \pi$, $I_2 = \frac{1}{2} [I_{in} - Q_{in}]$
- Pour $\delta = \pi/2$, $I_3 = \frac{1}{2} [I_{in} + U_{in}]$
- Pour $\delta = 3\pi/2$, $I_4 = \frac{1}{2} [I_{in} - U_{in}]$

5 - Capteur et caméra CCD

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

- quantum efficiency up to 60 %, capteur SONY ICX285 interligne bas bruit
- extremely low noise, down to 4 e⁻ rms, puits de potentiel de 18000 e
- rapport S/B à mi saturation voisin de 100
- 12 bit dynamic range (18000 e / 4 e = 4500)
- thermoelectrical cooling (Peltier) down to -12 °C
- high resolution 1376 x 1040 pixel
- electronic shutter / exposure times from 500 ns - 3600 s

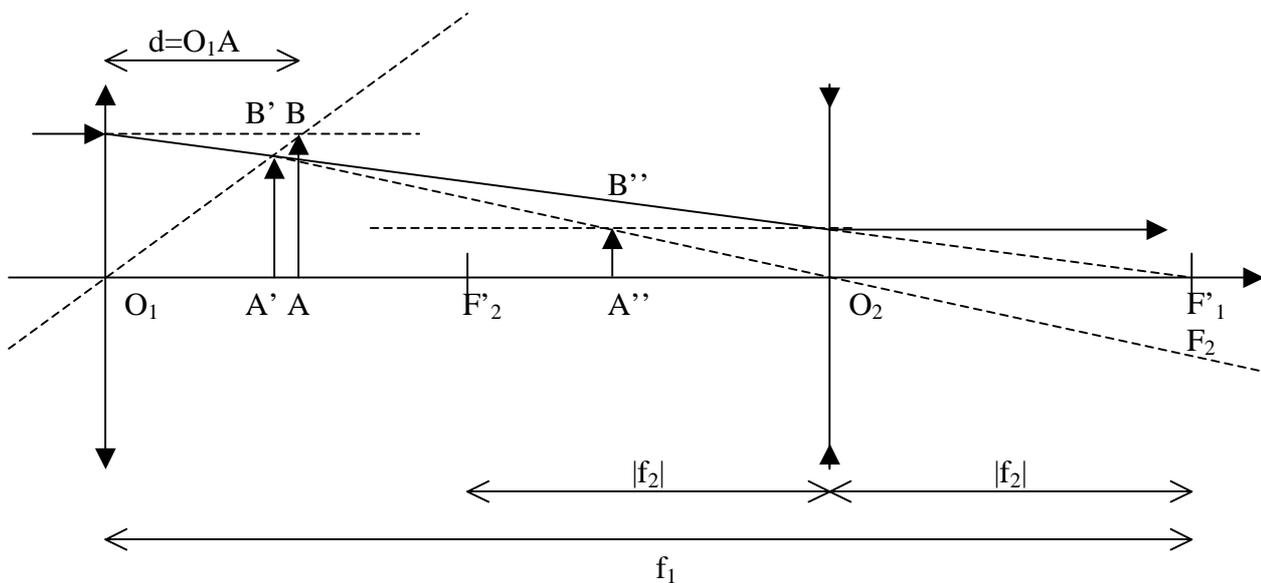
binning (horizontal & vertical), 1, 2, 4, 8
 region of interest (ROI)
 10 frames per second at full CCD resolution (16 MHz)



Rendement quantique du détecteur CCD

6 - Réducteur focal

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



Le plan image du télescope est représenté par l'objet AB. L'image de AB par la lentille convergente de focale $f_1 > 0$ est A'B'. Celle de A'B' par la lentille divergente de focale $f_2 < 0$ est A''B''. Le foyer image F'1 de la lentille convergente est confondu avec le foyer objet F2 de la divergente. Il est indispensable que A''B'' soit confondu avec AB pour ne pas perturber le fonctionnement des instruments focaux (spectrographe). On se fixe le grandissement du réducteur focal : $\gamma = -f_2 / f_1 = |f_2| / f_1 = 1/2$ avec $f_1 = 6.48$ m et $f_2 = -3.24$ m. La fente est en A et la préfente en A'.

1) connaissant γ , choix de 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) grandissement de la première lentille et O_1A'

grandissement de la lentille convergente dans ces conditions :

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

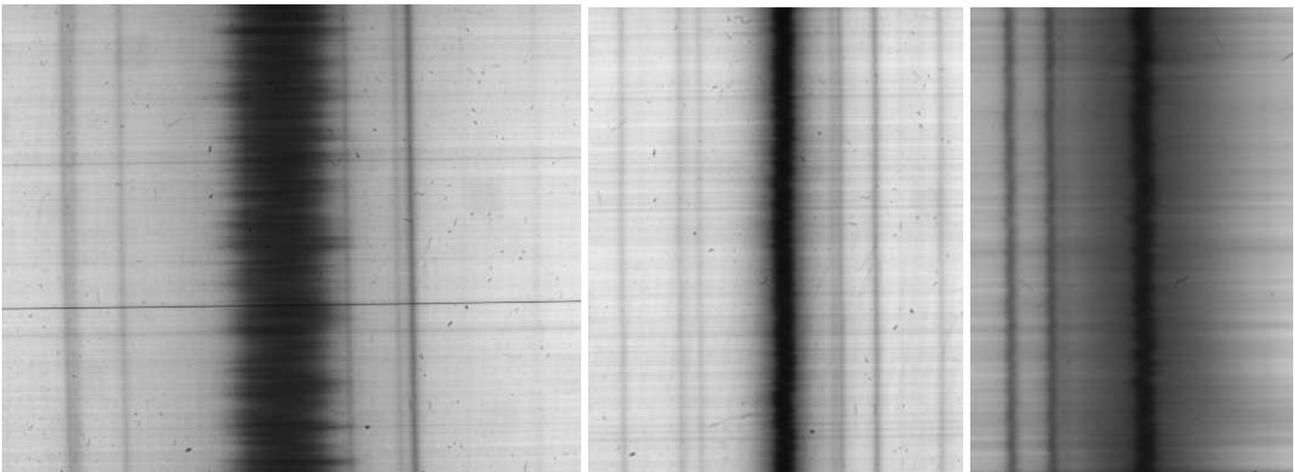
$$\text{Alors, } O_1A' = f_1 (1 - \gamma) / 2 = (1+\gamma)/2 O_1A = 1.62 \text{ m}$$

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

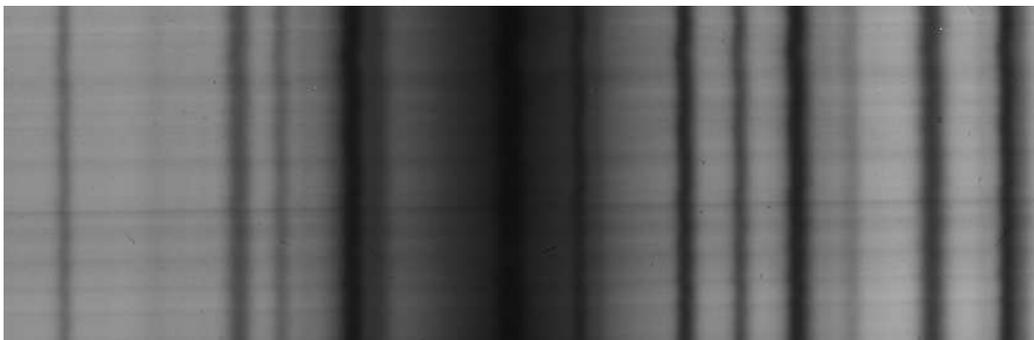
3) grandissement de la seconde lentille

grandissement de la lentille divergente dans ces conditions :

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



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



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

1 - Spectrographe en version DPSM

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

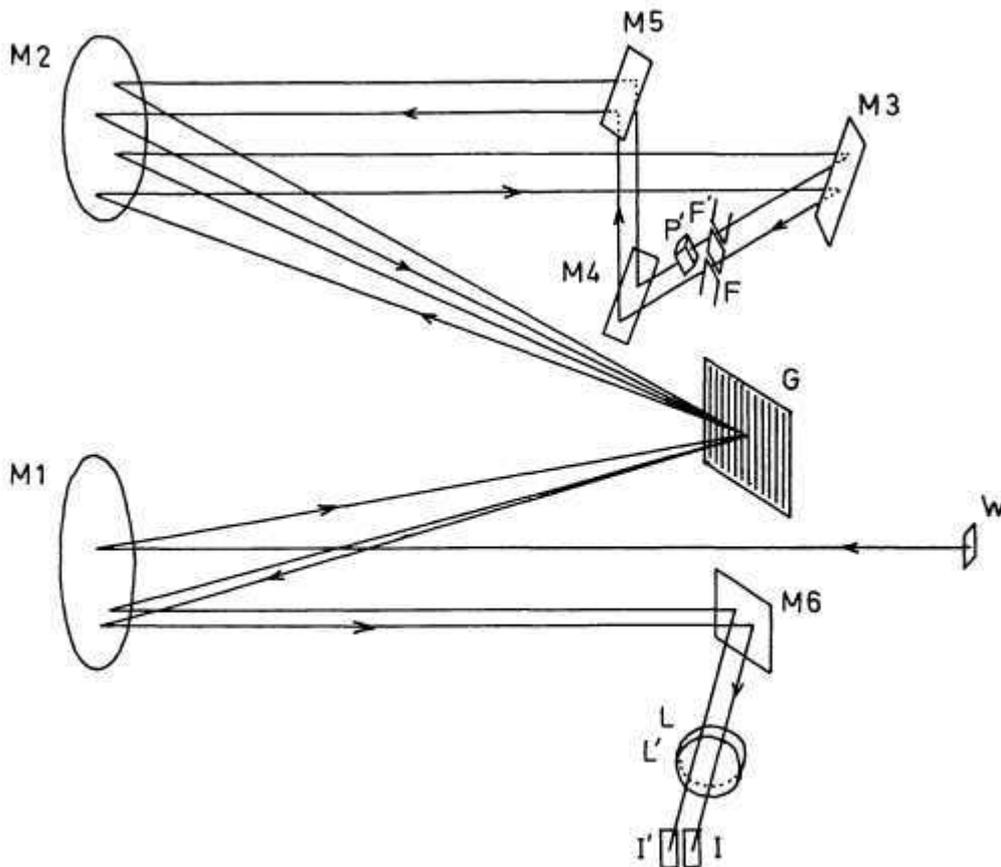


Fig. 1. Diagram of the subtractive double pass spectrograph.

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

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

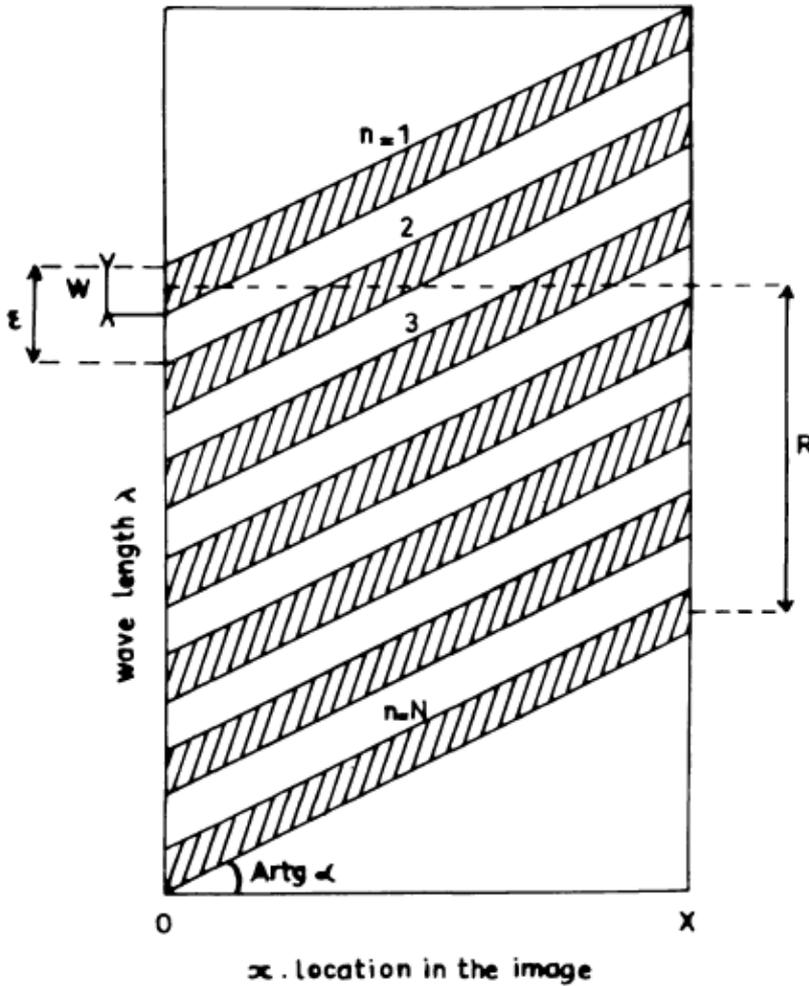
La longueur d'onde varie d'un bord à l'autre du canal selon la loi:

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

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

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

In the Meudon spectrograph $X = 8 \text{ mm}$, $1/\alpha = 8.3 \text{ mm}/\text{\AA}$, $\epsilon = 0.36 \text{ \AA}$, $w = 0.18 \text{ \AA}$ 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.

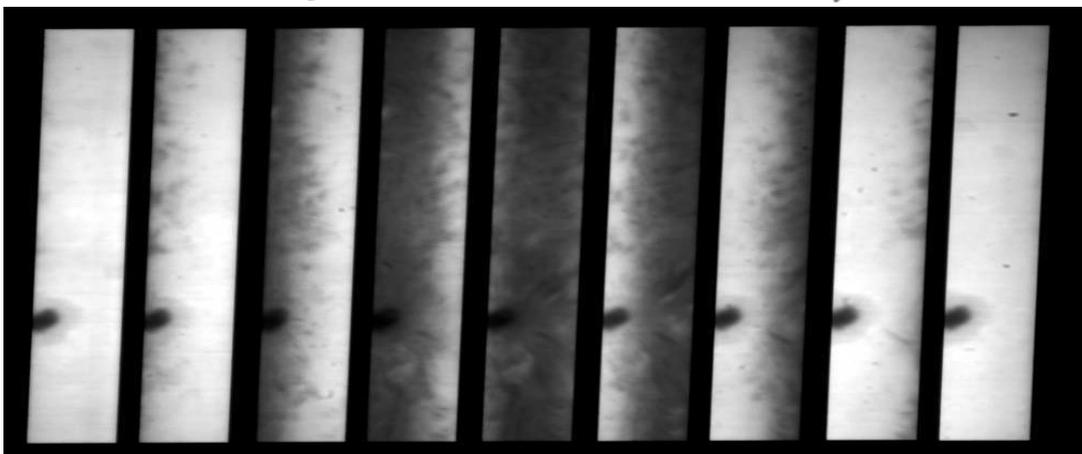
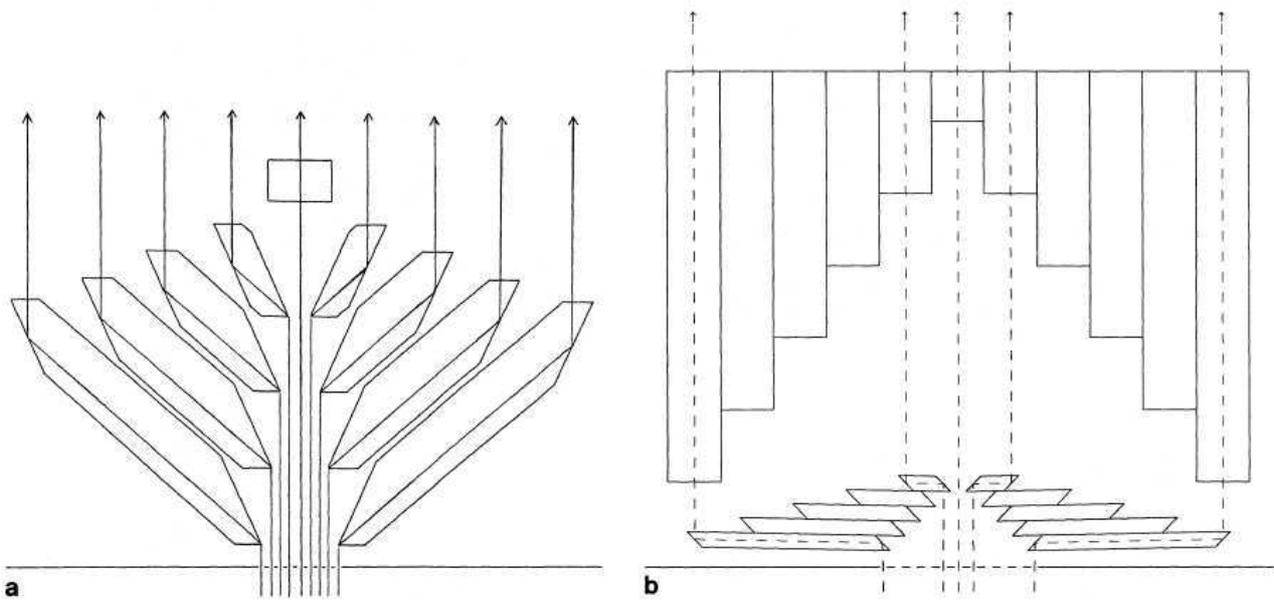
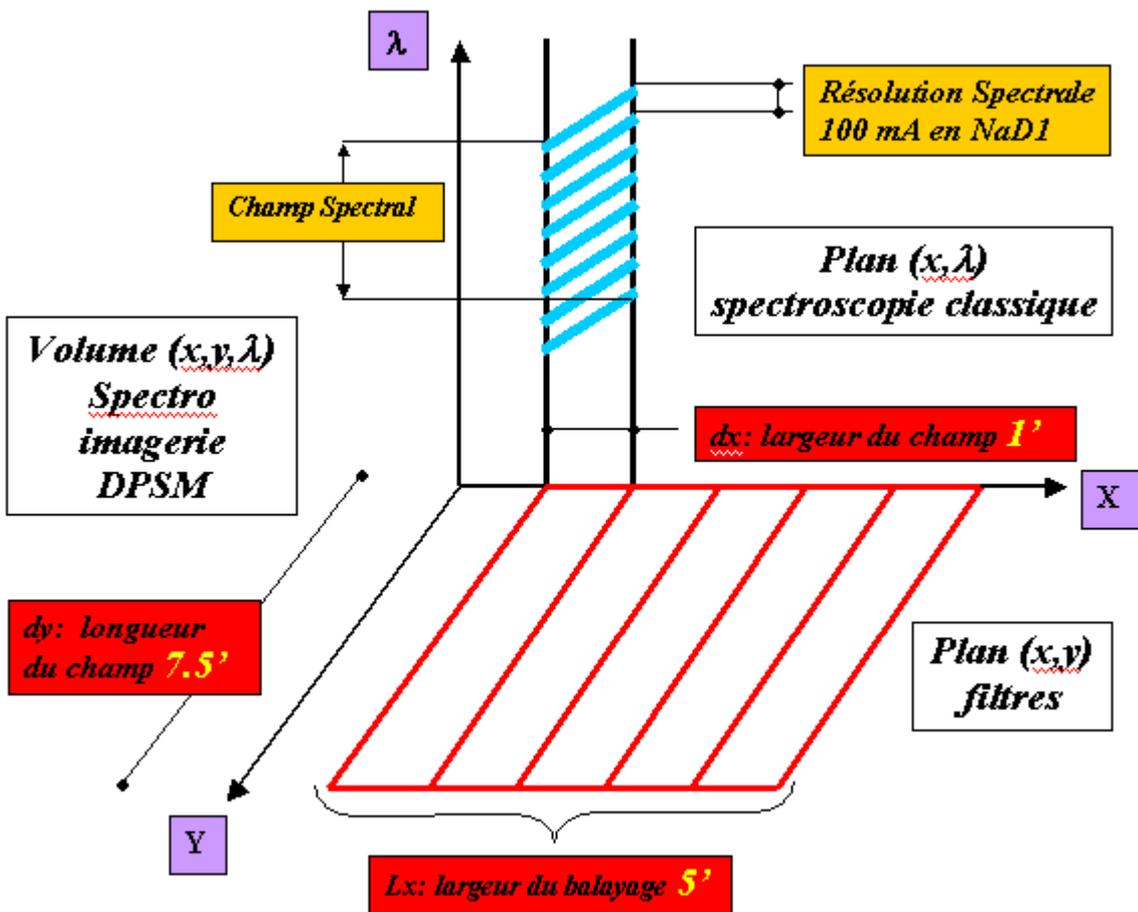


Image DPSM à 9 canaux simultanés: raie H alpha



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 μ | 1500 μ | F / 60 | 9 mm | Tour Meudon |
| 2500 μ | 1500 μ | F / 60 | 9 mm | VTT |
| 1200 μ | 400 μ | F / 60 | 9 mm | Pologne |
| 1200 μ | 400 μ | F / 60 | 9 mm | Themis et VTT |
| 1000 μ | 400 μ | F/100 | 9 mm | Tour Meudon |

**BOÎTES 11
CANAUX**

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

**BOÎTE 14
CANAUX**

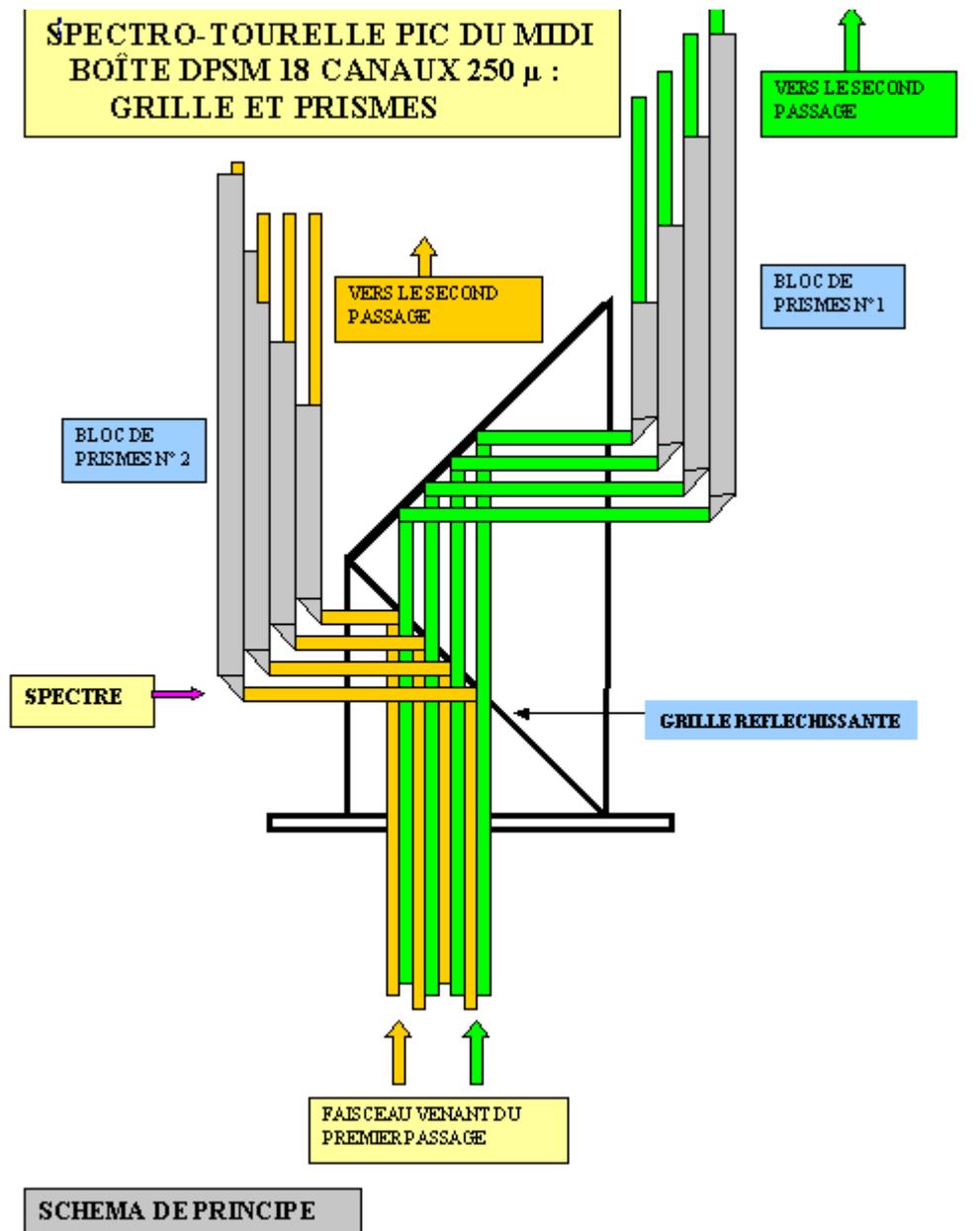
| | | | | |
|-------|-------|--------|------|---|
| 250 μ | 100 μ | F / 60 | 3 mm | Themis terminée mais jamais mise en service |
|-------|-------|--------|------|---|

**BOÎTES 16
CANAUX**

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

**BOÎTES 18
CANAUX**

| | | | | |
|-------|------|---------|--------|--------------------------|
| 600μ | 600μ | F / 60 | 3.6 mm | Themis : jamais financée |
| 250 μ | 250μ | 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

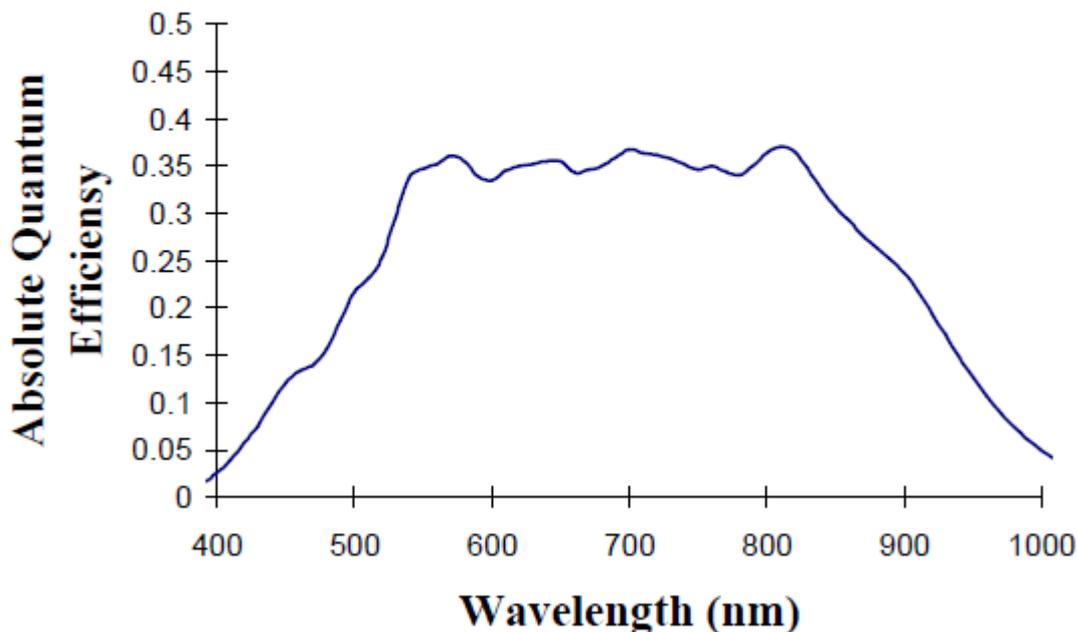
Driver PVCAM

Langage de programmation: V-Pascal

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



3 - Chariot à deux prismes

np=nombre de pas > 0 en marche avant <0 en marche arrière

DEPLACEMENT DE NP PAS EN AVANT SI NP>0 OU EN ARRIERE SI NP<0 avec réception d'un code de retour

OpenSerial(3,9600,8,NoParity,1) 9600 bauds, 8 bits sans parité

{ Envoi de la consigne de déplacement }

Transmit(str(np)+chr(13)) on envoie une chaîne de caractères ASCII + CR

{ Attente du code de retour }

repeat

StartClock mise en route du chronomètre

repeat

until clock>=100 on regarde toutes les 100 ms si le code retour est arrivé

retcode:=RxString

until length(retcode)>10

CloseSerial(3)

le code retour est arrivé, le programme peut continuer

RAZ retour à ZERO (le RAZ n'envoie pas de code de retour)

OpenSerial(3,9600,8,NoParity,1) 9600 bauds, 8 bits sans parité

{ Envoi de la consigne de retour }

Transmit('0'+chr(13));

on envoie une chaîne de caractères ASCII + CR

CloseSerial(3);

on sort du programme

XIV - Imagerie large bande à la Tour Solaire de Meudon

1 - Montages possibles

a - Lentille de champ de 400 mm au foyer du télescope + objectif de 50 mm de réduction d'image
Filtre interférentiel 100 Å devant l'objectif, champ de l'ordre de 1' x 1'

b - Objectif de 700 mm, 1400 mm ou 3000 mm en faisceau parallèle (descente du faisceau issu du coélostate directement sur le Newton à 45°), pas d'objectif sur la caméra qui est placée au foyer, filtre interférentiel 100 Å, champ de l'ordre de plusieurs minutes d'arc.

2 - Détecteur CMOS

Capteur CMOS IBIS 6600 de CYPRESS

Puits de potentiel maximum = 21500 e⁻

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

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

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

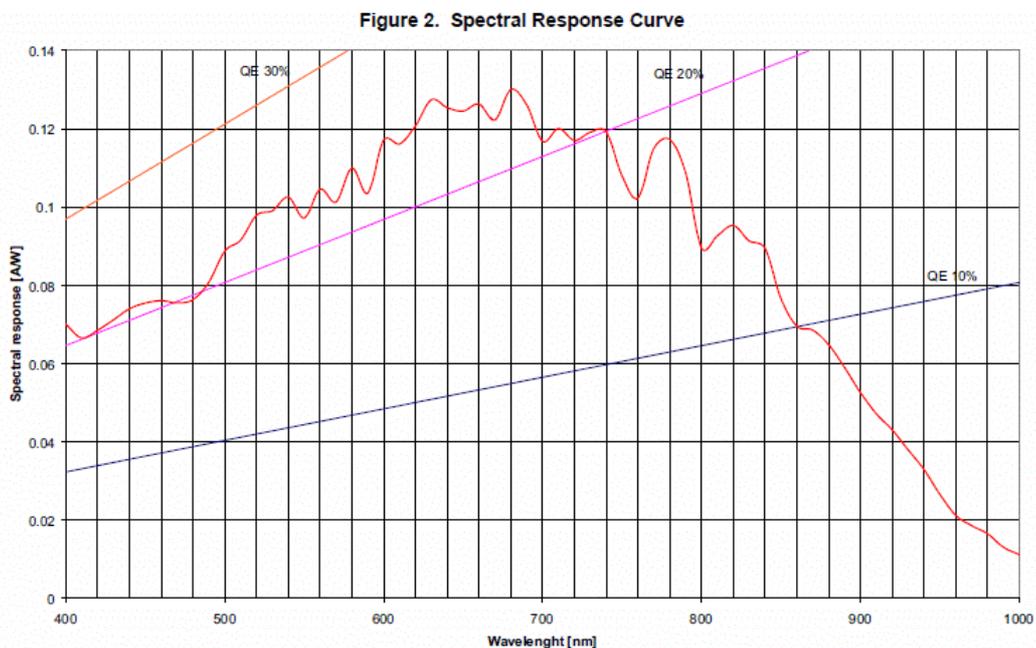
Rapport signal/bruit voisin de 100 à mi saturation soit 1% de bruit dans le signal

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

Conversion A/D: 21 e⁻ par ADU

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

Caméra CMOS de marque Pixelink, modèle PL-B781F



Lecture sous IDL du format RAW 3D utilisé en rafale

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

XV - Polarimétrie à la Tour Solaire de Meudon - méthodes

1 - POLARIMETRE A 2 CRISTAUX LIQUIDES (expérience actuelle en M2)

| <i>Composants</i> | <i>Avantages</i> | <i>Inconvénients</i> |
|---|--------------------------------------|---|
| 2 cristaux liquides 20 mm + polariseur | Tous les paramètres de Stokes QUV | Mesures I+S et I-S non simultanées -> La turbulence induit un signal polarimétrique parasite important, qui est un artefact dit de "seeing cross talk" |

TP possibles:

sur banc:

- détermination des axes et des tensions 0 onde, 1/4 onde, 1/2 onde, 3/4 onde, alignements;

sur le ciel:

- mesure des profils de Stokes Q, U, V sur une tache; déduction du champ vectoriel

2 - POLARIMETRE A GRILLE, MULTIVOIE (fabrication LESIA en attente)

| <i>Composants</i> | <i>Avantages</i> | <i>Inconvénients</i> |
|--|--|--|
| 1 cristal liquide 40 mm + grille + séparateur biréfringent | I+S et I-S simultanés -> Pas de "turbulence cross talk" Inversion de voies possible -> polarimétrie profonde (mesure des champs faibles) Les polarimètres PRO ont 2 voies | Champ zébré par la grille -> amélioration possible: translateur de grille motorisé |

Remarque:

La mesure de U est possible avec un second cristal liquide (ou une 1/4 onde FICHOU) en série

TP possibles:

sur banc:

- détermination des axes et des tensions 0 onde, 1/4 onde, 1/2 onde, 3/4 onde

- étude d'un séparateur biréfringent: mesure de la séparation chromatique avec filtres interférentiels,
étude de la théorie du séparateur;

sur le ciel:

- mesure des profils V sur une tache; déduction du champ longitudinal

- mesure des profils Q près du limbe (effet Hanlé)

3 - POLARIMETRE A TRANSLATION DE FAISCEAU, DOUBLE VOIE (non testé)

| <i>Composants</i> | <i>Avantages</i> | <i>Inconvénients</i> |
|---|--|-----------------------|
| 1 lame 1/4 onde FICHOU 30 mm externe au polarimètre à 45° + double translateur + séparateur biréfringent | I+S et I-S simultanés -> Pas de "turbulence cross talk" Inversion de voies possible -> polarimétrie profonde (mesure des champs faibles) Les polarimètres PRO ont 2 voies | aucun (en théorie...) |

Remarques:

La mesure de Q est possible en retirant la 1/4 onde. Celle de U est possible en tournant la 1/4 onde de 45° (axes parallèles à ceux du séparateur). On peut évidemment remplacer la 1/4 onde FICHOU par un ou deux cristaux liquides en série permettant de mesurer QUV avec simultanéité et échange de voies possible.

TP possibles:

sur banc:

- détermination des axes de la 1/4 onde
- étude d'un séparateur biréfringent: mesure de la séparation avec filtres interférentiels
- réglages du double translateur de faisceaux pour aligner les deux images en sortie

sur le ciel:

- mesure des profils V sur une tache; déduction du champ longitudinal
- mesure des profils Q au limbe (effet Hanlé)

4 - ROTATEUR DE POLARISATION

| <i>Composants</i> | <i>Avantages</i> | <i>Inconvénients</i> |
|--|------------------|---|
| 1 rotateur de polarisation 30 mm + polariseur | vitesse | Mesures I+S et I-S non simultanées -> La turbulence induit un signal polarimétrique parasite important, qui est un artefact dit de "seeing cross talk" |

Remarques:

Le rotateur permet de mesurer Q; si on ajoute une 1/4 onde FICHOU, il mesure V.

TP possibles:

sur banc:

- Qu'est ce qu'un rotateur de polarisation et comment se compare t'il à une lame 1/2 onde quand la rotation est de 90° ?

sur le ciel:

- mesure des profils Q au limbe (effet Hanlé)
- mesure des profils V sur une tache; déduction du champ longitudinal

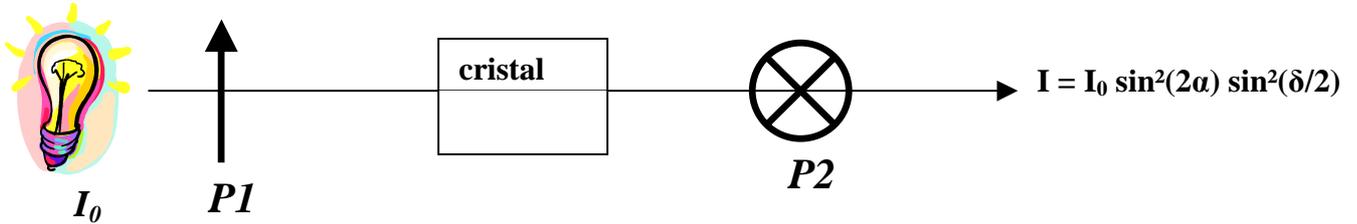
Remarque générale: les mesures de polarisation à la tour solaire ne sont pas exemptes de polarisation instrumentale en raison des réflexions métalliques sous incidence oblique variable dans le temps.

5 - METHODES DE CALIBRATION DES CRISTAUX LIQUIDES A RETARD VARIABLE (LCVR) ET DES LAMES CRISTALLINES CLASSIQUES

a - ALIGNEMENT DES AXES

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

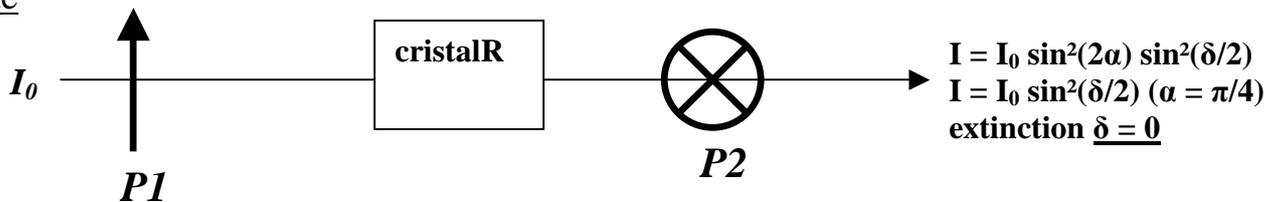
Eviter $\delta = 0$ et 2π ; extinction, donc parallélisme des axes avec P1/P2, pour $\alpha = 0$ modulo $\pi/2$



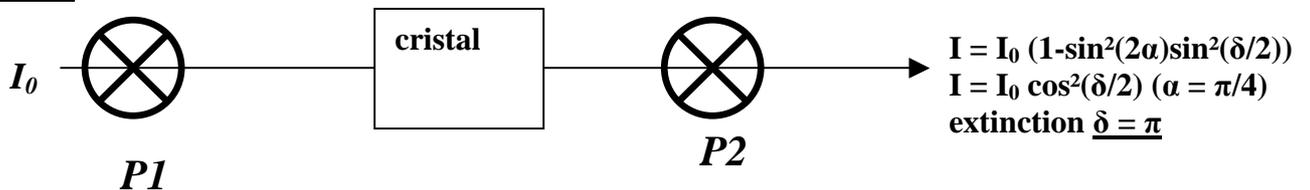
Tourner le cristal de $\pi/4$ après avoir trouvé ses axes selon cette méthode

b - CALIBRATION 0 ET DEMI ONDE

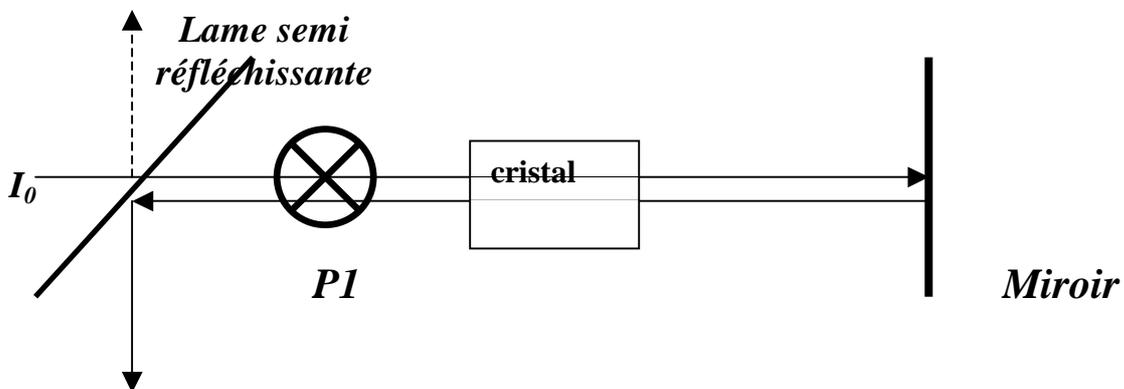
0 onde



demi onde



c- CALIBRATION PAR AUTOCOLLIMATION QUART ET TROIS QUARTS D'ONDE



$$I = I_0 (1 - \sin^2(2\alpha) \sin^2(\delta)) = I_0 \cos^2(\delta) \quad (\text{avec } \alpha = \pi/4)$$

extinction lorsque $\delta = \pi/2$ ou $\delta = 3\pi/2$

XVI - Polarimétrie à la Tour Solaire de Meudon - polarimètres disponibles

1 - POLARIMETRE MULTIVOIE A CRISTAL LIQUIDE (RETARD VARIABLE δ), GRILLE ET SEPARATEUR BIREFRINGENT

Caractéristiques : mesure *complète* de la polarisation linéaire Q et V dans deux états de polarisation simultanés avec échange de voies.

On peut montrer que l'on mesure **simultanément** les deux quantité S_1 et S_2 :

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{1}{2} [I_{in} + Q_{in} \cos(\delta) - V_{in} \sin(\delta)] \\ S_2 &= \frac{1}{2} [I_{in} - Q_{in} \cos(\delta) + V_{in} \sin(\delta)] \end{aligned}$$

Pour $\delta = 0$, $S_1 = \frac{1}{2} [I + Q]$ et $S_2 = \frac{1}{2} [I - Q]$

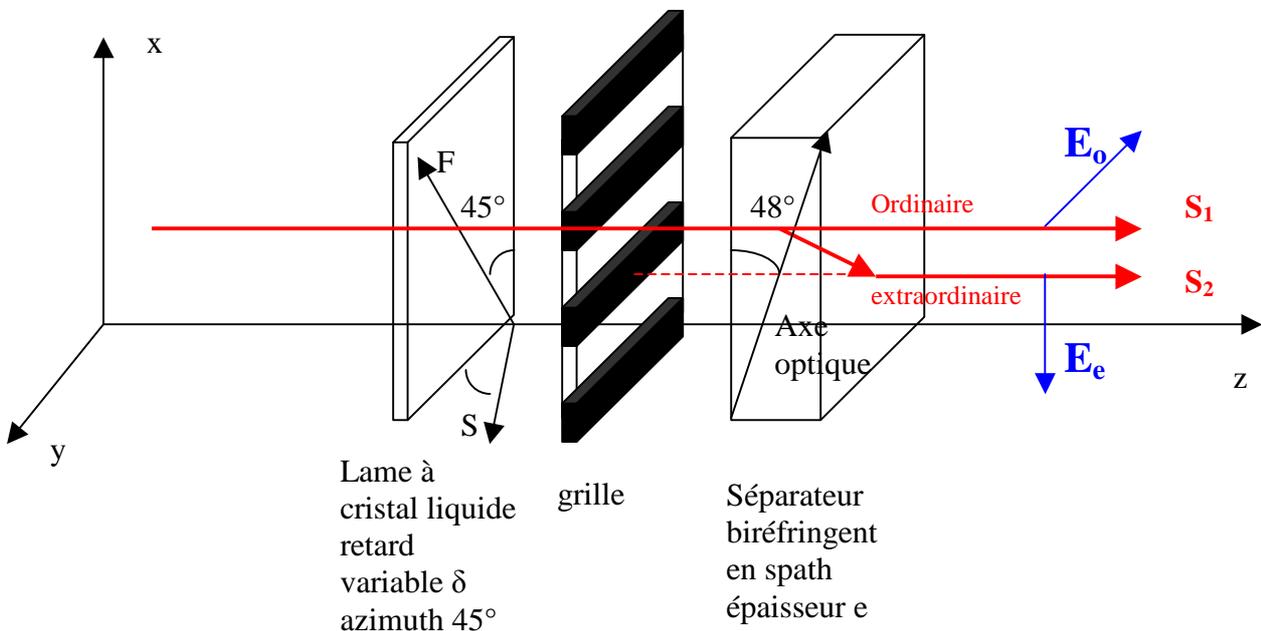
Pour $\delta = \pi$, $S'_1 = \frac{1}{2} [I - Q]$ et $S'_2 = \frac{1}{2} [I + Q]$ échange de voies sur Q

Pour $\delta = \pi/2$, $S_1 = \frac{1}{2} [I - V]$ et $S_2 = \frac{1}{2} [I + V]$

Pour $\delta = 3\pi/2$, $S'_1 = \frac{1}{2} [I + V]$ et $S'_2 = \frac{1}{2} [I - V]$ échange de voies sur V

Avantage de l'échange de voies

On peut montrer que quantité $F = \frac{1}{4} [(S_1 S'_2) / (S'_1 S_2) - 1]$ élimine les facteurs de transmission et de gain des deux voies, donc est indépendante du Flat Field qui devient inutile. Ce facteur est proportionnel au taux de polarisation Q/I ou V/I. C'est une méthode de choix en polarimétrie profonde (mesure des polarisations faibles).



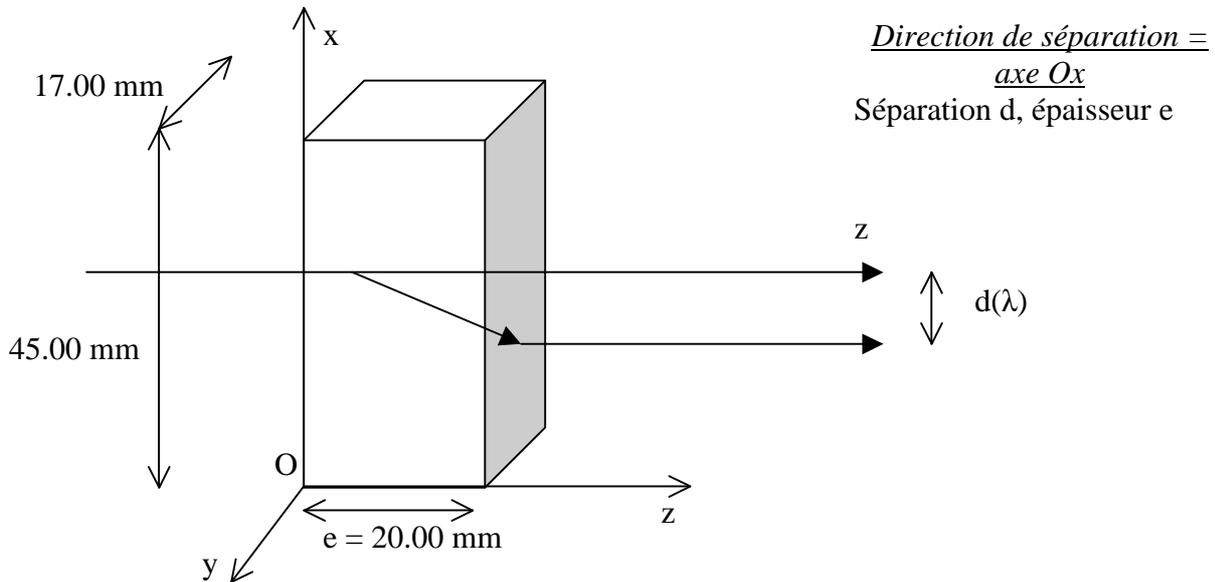
L'axe optique du séparateur est incliné par rapport au plan xOy de φ tel que $\cos 2\varphi = (n_e^2 - n_o^2) / (n_e^2 + n_o^2)$ au maximum de déviation ce qui donne $\varphi = 48^\circ$ ($n_o = 1.658$ et $n_e = 1.486$ pour le spath).

La séparation s vaut alors, au maximum de déviation, $s = e (n_o^2 - n_e^2) / (2 n_o n_e)$, numériquement $s = 0.11 e$ pour le spath ($e = 20$ mm donne $s = 2.20$ mm).

Spécifications du cristal de spath disponible:

Séparateur à grille, trous 2.0 mm, barreaux 2.4 mm

Hypothèse : $f=45$ m, $f/D=75$, $1'' = 218 \mu$ (1 trou = $10''$ environ)



Le séparateur délivre deux faisceaux parallèles linéairement polarisés et de polarisations orthogonales. e est l'épaisseur du séparateur et d la séparation obtenue entre les deux faisceaux émergents parallèles et polarisés orthogonalement. La séparation est maximale pour l'angle φ_m (axe optique, face d'entrée) ou $\pi/2 - \varphi_m$ (axe optique, normale à la face d'entrée) lorsque :

$$\cos(2\varphi_m) = (n_e^2 - n_o^2) / (n_e^2 + n_o^2)$$

$$\tan(r_e) = d / e = \sin(2\varphi) / (\cos(2\varphi) + (n_o^2 + n_e^2) / (n_o^2 - n_e^2))$$

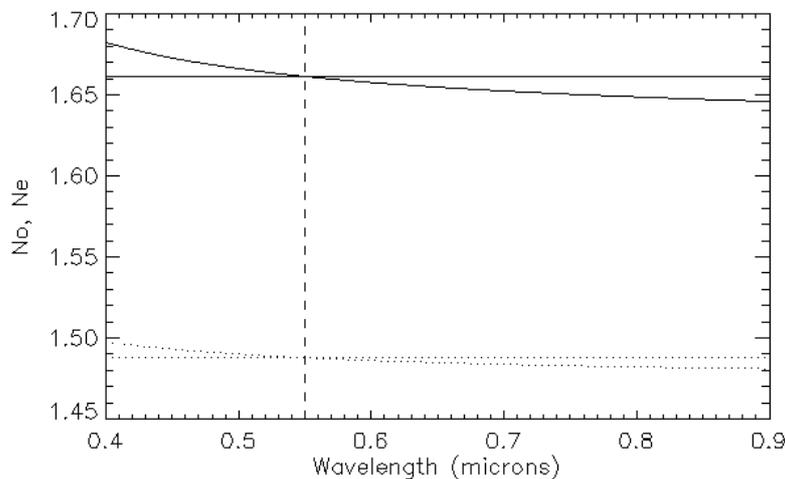
indice ordinaire (λ en microns):

$$n_o = (2.69705 + 0.0192064 / (\lambda^2 - 0.01820) - 0.0151624 \lambda^2)^{1/2}$$

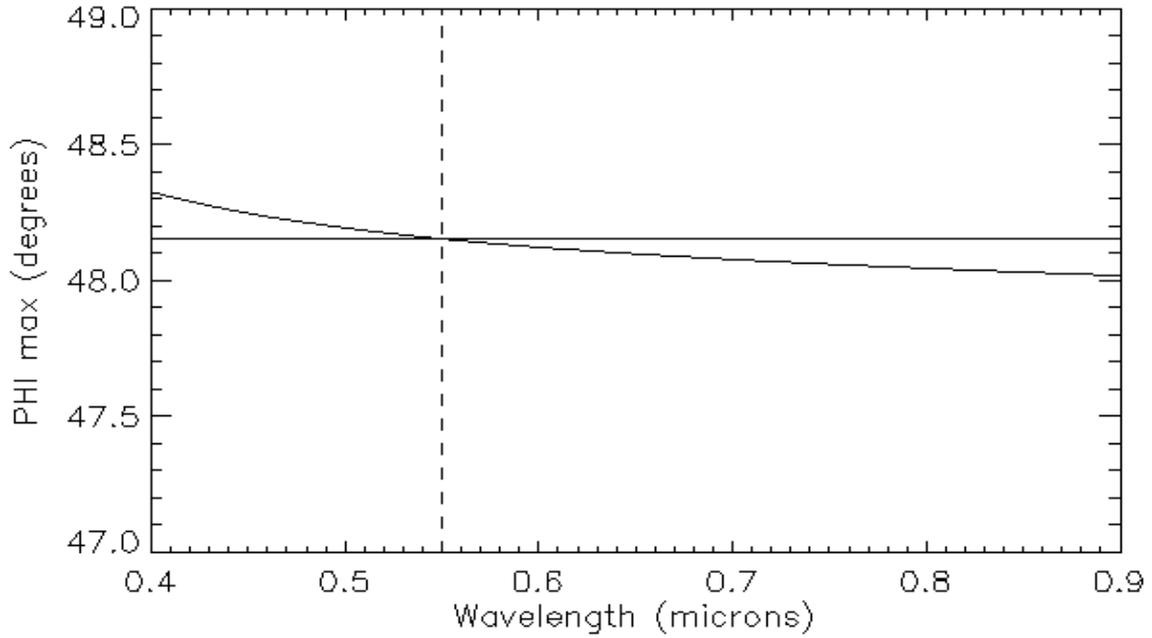
indice extraordinaire (λ en microns):

$$n_e = (2.18438 + 0.0087309 / (\lambda^2 - 0.01018) - 0.0024411 \lambda^2)^{1/2}$$

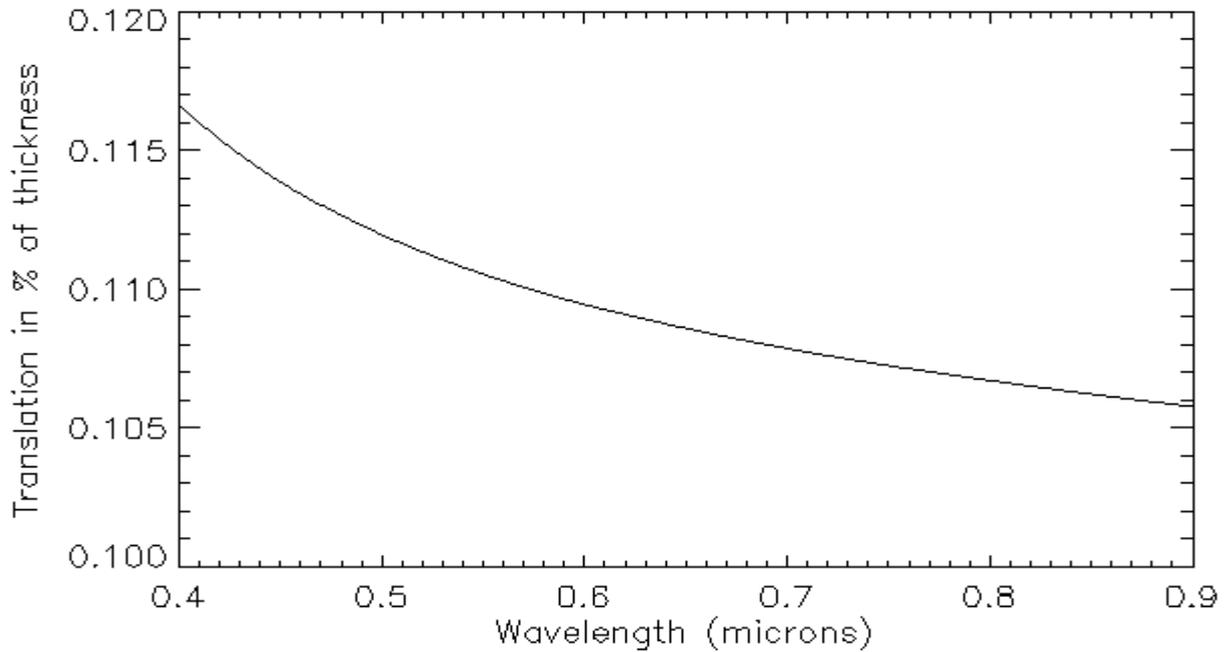
donne $\varphi_m = 48.15^\circ$ à la longueur d'onde de 550 nm



n_o et n_e en fonction de la longueur d'onde



φ_m pour séparation maximale en fonction de la longueur d'onde



Séparation d/e en fonction de la longueur d'onde pour $\varphi = 48.15^\circ$

résultats

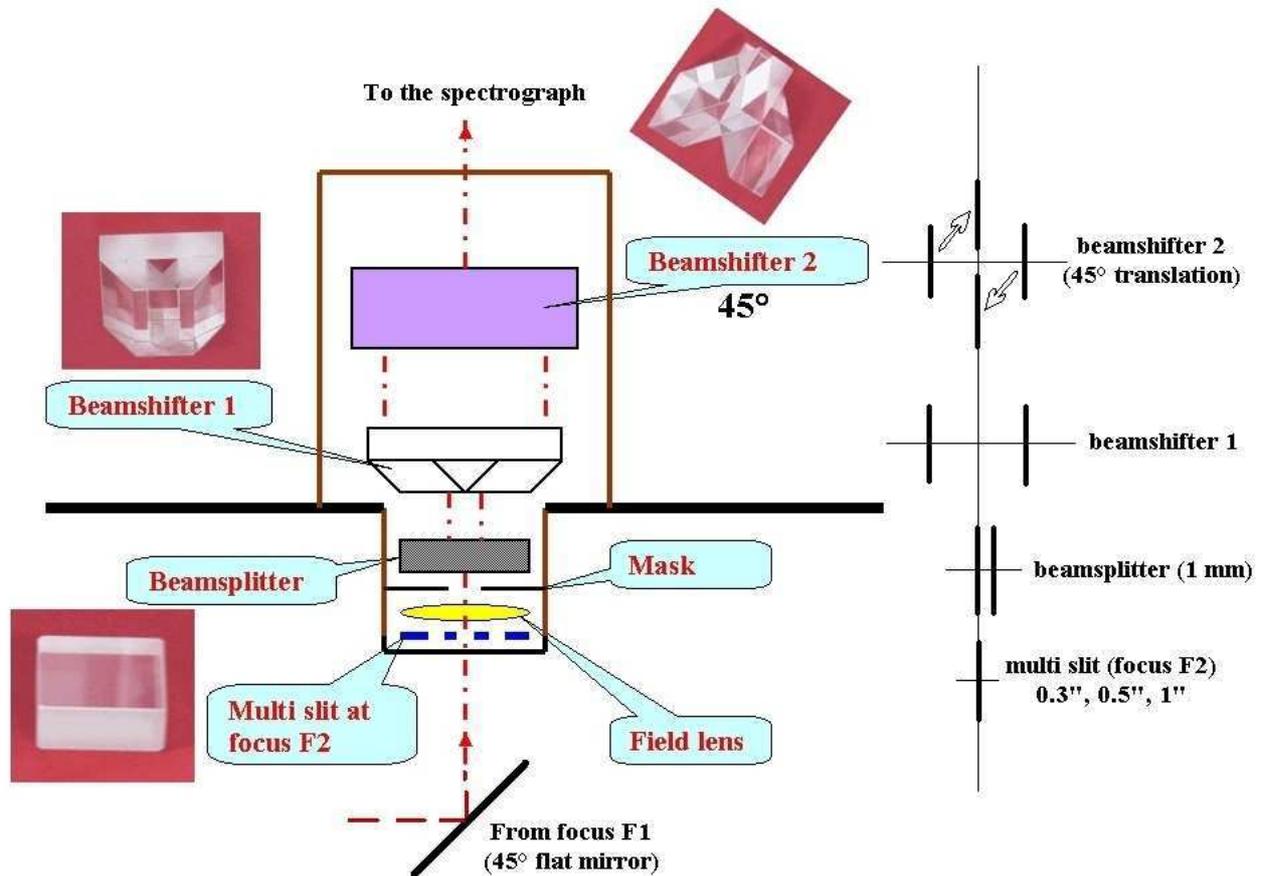
$\varphi_m = 48.15^\circ$ à la longueur d'onde de 550 nm
 pour $\varphi = 45^\circ 22'$ (valeur Fichou) et $e = 20$ mm
 à $\lambda = 400$ nm : $d = 2.32$ mm
 à $\lambda = 550$ nm : $d = 2.20$ mm
 à $\lambda = 700$ nm : $d = 2.15$ mm
 à $\lambda = 850$ nm : $d = 2.12$ mm

On peut utiliser une grille à trous de 2.0 mm et barreaux de 2.4 mm (pas de recouvrement sur 400-850 nm) ou encore une grille à trous et barreaux de 2.2 mm (optimisée pour 550 nm).

2 - POLARIMETRIE A TRANSLATION DE FAISCEAU SANS GRILLE

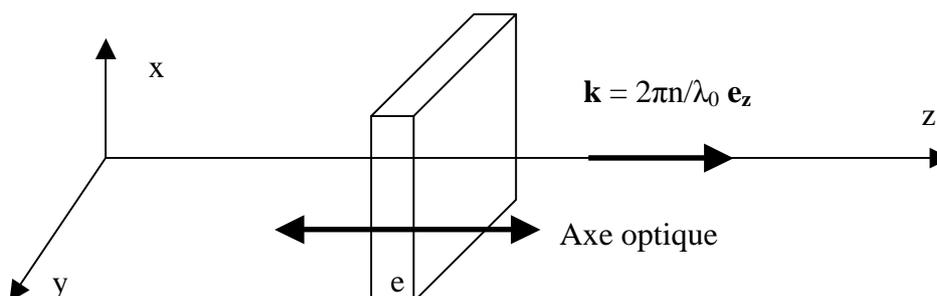
Il s'agit d'un polarimètre fabriqué par le PI du GEPI pour le Pic du Midi à deux faisceaux polarisés orthogonalement et en ligne (nécessite le masquage de la moitié de la fente d'entrée dont la longueur de doit pas excéder 20 mm).

Il faut mettre devant une lame quart ou demi onde statique (échange de voies possible si cristal liquide) à 45° du séparateur biréfringent. En sortie V ou Q. Si on ajoute une demi onde en plus en entrée, on pourra déterminer U.



3 - ROTATEUR DE POLARISATION: PRINCIPE

Certains cristaux comme le quartz, lorsqu'ils sont éclairés de façon particulière, ont pour propriété de présenter naturellement une biréfringence circulaire, c'est à dire 2 indices de réfraction, ou deux vitesses de phase, pour la propagation d'ondes polarisées circulairement à droite et à gauche. Sur une polarisation linéaire, il en résulte une **rotation du plan de polarisation**, principe qu'utilisent les **rotateurs de polarisation à biréfringence circulaire naturelle**.



On considère une lame de quartz d'épaisseur e dans laquelle se propage un rayon lumineux parallèle à son axe optique dans la direction Oz . La lame se comporte donc comme un milieu isotrope d'indice n_0 pour la biréfringence linéaire.

Dans un milieu optiquement actif, il n'y a plus linéarité entre le vecteur déplacement \mathbf{D} et le champ électrique. \mathbf{D} dépend non seulement de \mathbf{E} mais de sa variation spatiale $\partial \mathbf{E}_i / \partial x_j$ ce qui entraîne dans notre cas l'apparition d'un terme proportionnel à $\mathbf{i} \mathbf{k} \wedge \mathbf{E}$ puisque qu'une dérivée spatiale est en $\mathbf{i} \mathbf{k}$ \wedge pour une onde plane avec $\mathbf{k} = 2\pi n / \lambda_0 \mathbf{e}_z$ (λ_0 longueur d'onde dans le vide).

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_{r,0} \mathbf{E} + i \epsilon_0 g n \mathbf{e}_z \wedge \mathbf{E}$$

g est le facteur de giration, n l'indice de réfraction dans la direction de \mathbf{k} et $\epsilon_{r,0} = n_0^2$

En écrivant $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$ avec $\epsilon_r = n^2$, il vient : $\epsilon_0 n^2 \mathbf{E} = \epsilon_0 n_0^2 \mathbf{E} + i \epsilon_0 g n \mathbf{e}_z \wedge \mathbf{E}$

soit deux équations sur E_x et E_y :

$$(n^2 - n_0^2) E_x + i g n E_y = 0$$

$$-i g n E_x + (n^2 - n_0^2) E_y = 0$$

qui n'a de solution non triviale que si son déterminant est nul soit si $n^2 = n_0^2 \pm g n$

ce qui donne en première approximation $n = n_0 \pm g/2$

pour $n_d = n_0 + g/2$, alors $E_y = i E_x$ définit une polarisation circulaire droite

pour $n_g = n_0 - g/2$, alors $E_y = -i E_x$ définit une polarisation circulaire gauche

On a donc 2 polarisations circulaires se propageant à des vitesses de phase différentes, d'où la notion de biréfringence circulaire.

Si maintenant la polarisation incidente est **linéaire**, on peut la décomposer en une somme de 2 polarisations circulaires droite et gauche puisque $(\cos \omega t, 0) = \frac{1}{2} (\cos \omega t, -\sin \omega t) + \frac{1}{2} (\cos \omega t, \sin \omega t)$. En notation complexe avec $E = E_x + i E_y$:

$$L'onde incidente s'écrit $E_{in} = E_0 [\frac{1}{2} e^{-i\omega t} + \frac{1}{2} e^{i\omega t}]$$$

A la sortie du cristal, l'onde sortante a acquis un déphasage égal à $\delta_d = 2\pi n_d e / \lambda$ sur sa composante circulaire droite et $\delta_g = 2\pi n_g e / \lambda$ sur sa composante circulaire gauche. Elle est donc égale à :

$$E_{out} = E_0 [\frac{1}{2} e^{-i\omega t} e^{i\delta_d} + \frac{1}{2} e^{i\omega t} e^{i\delta_g}] = E_0 e^{i(\delta_d + \delta_g)/2} [\frac{1}{2} e^{-i(\omega t - (\delta_d - \delta_g)/2)} + \frac{1}{2} e^{i(\omega t - (\delta_d - \delta_g)/2)}]$$

Il s'agit toujours de la somme de deux polarisations circulaires droite et gauche, donc d'une polarisation linéaire, à ceci près que l'opérateur multiplicatif $e^{i(\delta_d + \delta_g)/2}$ est un opérateur de **rotation** d'angle φ tel que $\varphi = (\delta_d + \delta_g) / 2 = \pi e (n_d + n_g) / \lambda = \pi e g / \lambda$.

La polarisation linéaire a donc tourné d'un angle $\varphi = \pi e g / \lambda$ dans le sens trigonométrique. Les milieux qui font tourner la polarisation vers la gauche sont levogyres, et vers la droite dextrogyres.

On a une rotation de $\pi/2$ si $e = \lambda / 2g$.

Pour le quartz, g est de l'ordre de 10^{-4} , un cristal d'environ 2.5 mm d'épaisseur fera donc tourner la polarisation de 90° dans le visible.

Un polarimètre rotateur de polarisation à cristaux liquides est disponible. La rotation du plan de polarisation est calée sur 90° .

4 - ROTATEUR DE POLARISATION ACHROMATIQUE A CRISTAL LIQUIDE DISPLAYTECH FERROELECTRIQUE 25 MM 400 - 700 NM

Temps de bascule entre deux états: 0.3 ms

Le rotateur de polarisation couplé à un polariseur donne un résultat équivalent à une lame demi onde inclinée à 45° par rapport aux axes du polariseur. Autrement dit, il sort d'un montage modulant entre deux états les quantités suivantes:

Etat 1: $1/2 (I+Q)$

Etat 2: $1/2 (I-Q)$

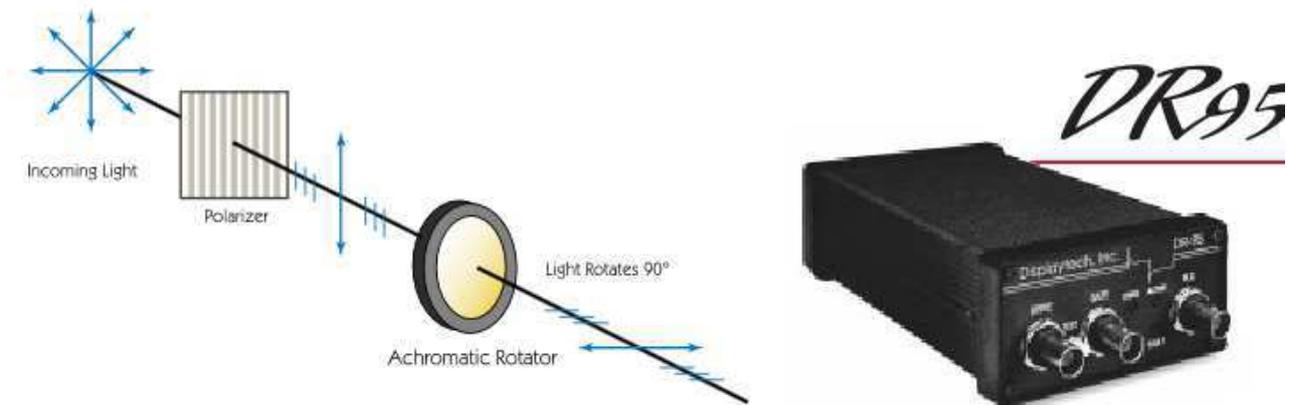
Ce qui équivaut à un retard de phase modulé entre 0 et π

L'incorporation au faisceau, devant le rotateur de polarisation, d'une lame quart d'onde statique dont les axes seront à 45° du polariseur donnera

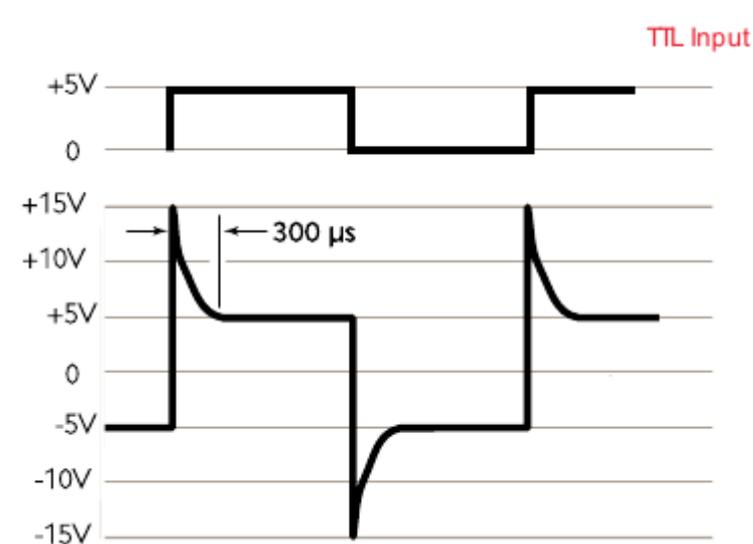
Etat 1: $1/2 (I+V)$

Etat 2: $1/2 (I-V)$

Ce qui équivaut à un retard de phase modulé entre $\pi/2$ et $3\pi/2$



Fonctionnement: le cristal liquide est alimenté sous ± 5 V faisant suite à un transitoire à ± 15 V via câble coaxial par le contrôleur DR95, selon que ce contrôleur reçoit en entrée un signal TTL de 5 V ou 0 V (schéma ci dessous). Ce signal TTL de pilotage est généré par une interface électronique à liaison RS232.

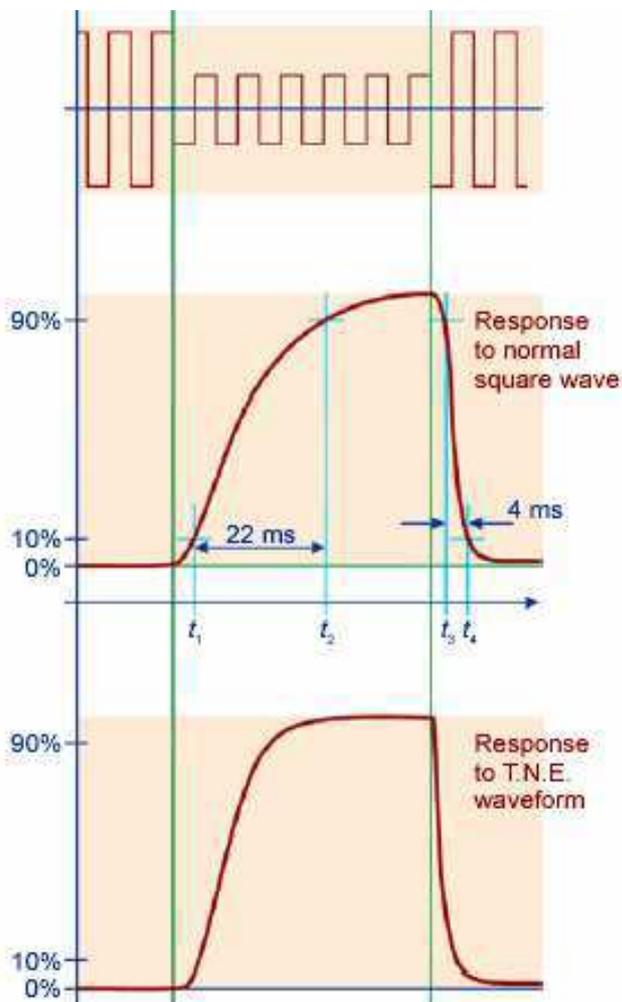


```
//initialisation 38400 bauds, 8 bits
sans parité, du port RS232 "prt"
SetBaudRate(prt,38400);
SetComParameter(prt,8,0,0);
SetChar(cr,0,10);
//sélection du canal 0 (il y en a 4)
SendCom(prt,"port 0"+cr);
```

```
//activation de la modulation
SendCom(prt,"bit 1 1"+cr);
//appliquer + 5 V sur la lame
SendCom(prt,"bit 0 1"+cr)
//appliquer - 5 V sur la lame
SendCom(prt,"bit 0 0"+cr);
//desactiver la modulation
// en appliquant 0 V sur la lame
SendCom(prt,"bit 1 0"+cr);
```

5 - RETARDATEURS A CRISTAUX LIQUIDES MEADOWLARK 20 ET 40 MM CHROMATIQUES, CRISTAUX NEMATIQUES

Ces retardateurs permettent la réalisation de lames quart d'onde, demi onde ou trois quarts d'onde pour toute longueur d'onde entre 400 et 700 nm. A l'inverse des cristaux ferroélectriques, qui sont à *peu près* demi onde sur tout le spectre 400 - 700 nm, les cristaux nématiques peuvent être *exactement* quart, demi ou trois quart onde, pour toute longueur d'onde déterminée par ajustement de la tension imposée aux électrodes qui tient le matériau biféringent en sandwich. Ils permettent donc un travail très précis.



Les cristaux sont alimentés par un signal périodique carré à 2000 Hz dont on fait varier l'amplitude entre 0 et 10 V. Le temps de réponse du cristal est de l'ordre de 50 ms.

Pour accélérer la réponse, on utilise un pulse de tension bref à 10 V, de quelques ms, appelé Transient Nematic Effet (TNE), avant application de la tension définitive correspondant au retard choisi.

Les lames sont pilotées par un contrôleur D3040 lui même recevant ses instructions via une liaison RS232 depuis le PC instrumental.

Les instructions ASCII sont indiquées ci dessous (protocole de communication RS232, 38400 bauds, 8 bits sans parité).

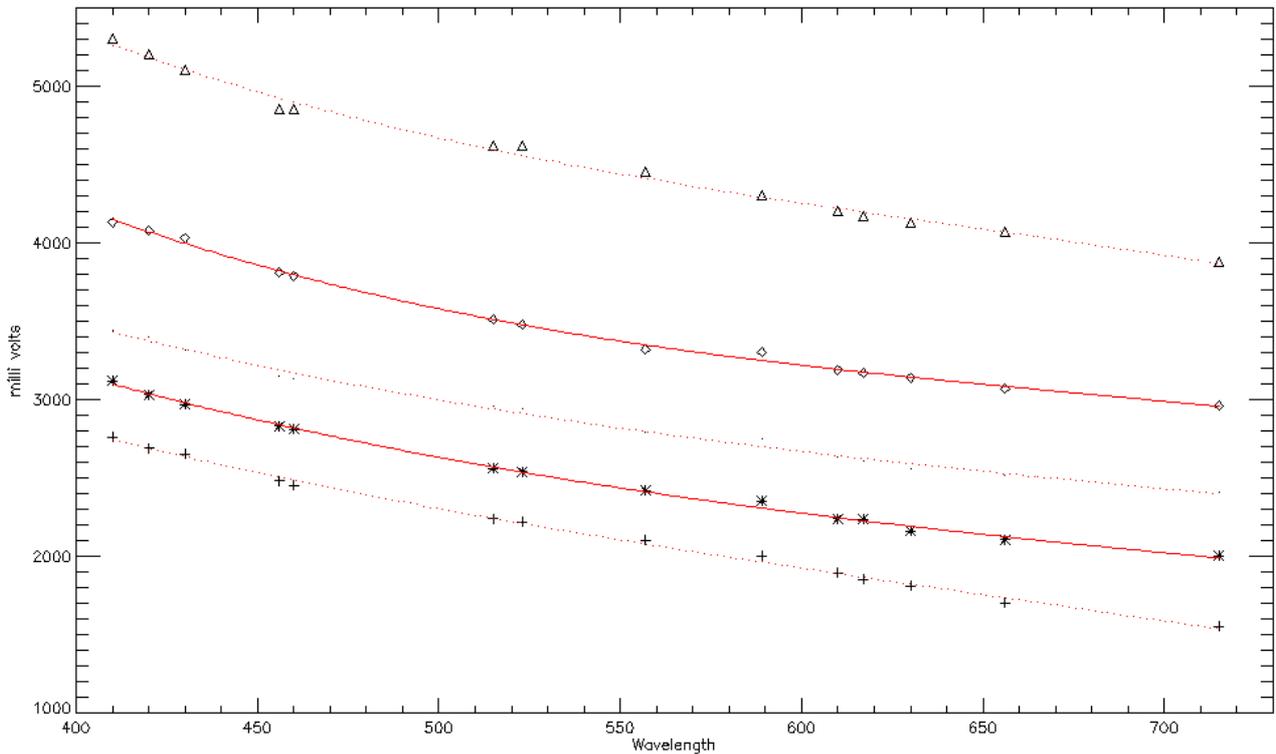
Table 2 ASCII terminal commands for the D3040

| Firmware Command | | Description | Notes |
|------------------|---|---|--|
| Ver. 1.xx | Ver. 2.xx | | |
| tty:n | (N/A) | Terminal mode. | See Appendix A. This command is discontinued in firmware versions 2.xx. |
| ldac:n,i | ld:n,i | Sets the modulation voltage on the specified LC channel. Converts an integer i to a square-wave amplitude voltage. | n = LC channel (1,2,3,4) i = 16-bit integer (0-65535) that translates to voltage as $V = i/6553.6$. |
| ldac:n,? | ld:n,? | Query voltage setting on channel n . | n = LC channel (1,2,3,4) Controller returns a 16-bit value i , corresponding to a voltage by $V = i/6553.6$ |
| (N/A) | ldd:i ₁ , i ₂ , i ₃ , i ₄ | Simultaneously sets the modulation voltages on all four LC channels. Converts an integer i to a square-wave amplitude voltage. | This command is enabled in firmware versions 2.xx only. |
| (N/A) | ldd:? | Query the voltage settings on all four channels. | Controller returns a 16-bit value i , corresponding to a voltage by $V = i/6553.6$. This command is enabled in firmware versions 2.xx only. |
| (N/A) | tne:n,t,i | Activate TNE switching on channel n . t = duration of TNE pulse (1-255 ms), i is a 16-bit integer corresponding to the amplitude of the TNE pulse by $V = i/6553.6$ | Specifying $t=0$ turns off the TNE feature. This command is enabled in firmware versions 2.xx only. |
| (N/A) | tne:n,? | Query the TNE duration and voltage settings on channel n . | This command is enabled in firmware versions 2.xx only. |

Protocole de commande du contrôleur des lames via liaison RS232

Avertissement: les tensions en mV doivent être multipliées par 6.5536 pour obtenir les valeurs à transmettre au polarimètre

```
//Exemple de programme de pilotage (langage CL)
SetChar(cr,0,13);
SetBaudRate(port,38400);
SetComParameter(port,8,0,0);
SetComFastMode(port);
//Activation du transitoire pour la durée du programme avec pulse de 10 V
SendCom(port,"tne:4,5,65000"+cr);
//tension à v1 (valeur ASCII) sur le port 4 du contrôleur auquel la lame est connectée
SendCom(port,"ld:4,"+v1+cr);
//acquérir le parametre de Stokes I+S
TakeImage(1);
//tension à v2 (valeur ASCII) sur le port 4 du contrôleur auquel la lame est connectée
SendCom(port,"ld:4,"+v2+cr);
//acquérir le parametre de Stokes I-S
TakeImage(2);
```



Courbe de tension, lame 7092, pour 1/4, 1/2, 3/4, 1, 5/4 onde en fonction de la longueur d'onde

valeurs mesurées sur banc optique Février 2008 lame de 40 mm 7092 (seule lame de 40 mm)

WL=410

20301 UI / 3097 mV / I+Q ONDE
 27192 UI / 4149 mV / I-Q 1/2 ONDE
 22480 UI / 3430 mV / I+V 3/4 ONDE
 34486 UI / 5262 mV / I-V 1/4 ONDE
 17989 UI / 2744 mV / I-V 5/4 ONDE

WL=420

19905 UI / 3037 mV / I+Q ONDE
 26677 UI / 4070 mV / I-Q 1/2 ONDE
 22112 UI / 3374 mV / I+V 3/4 ONDE
 33961 UI / 5182 mV / I-V 1/4 ONDE
 17625 UI / 2689 mV / I-V 5/4 ONDE

WL=430

19525 UI / 2979 mV / I+Q ONDE
 26189 UI / 3996 mV / I-Q 1/2 ONDE
 21758 UI / 3320 mV / I+V 3/4 ONDE
 33462 UI / 5105 mV / I-V 1/4 ONDE
 17272 UI / 2635 mV / I-V 5/4 ONDE

WL=456

18603 UI / 2838 mV / I+Q ONDE
 25043 UI / 3821 mV / I-Q 1/2 ONDE
 20902 UI / 3189 mV / I+V 3/4 ONDE
 32279 UI / 4925 mV / I-V 1/4 ONDE
 16408 UI / 2503 mV / I-V 5/4 ONDE

WL=460

18469 UI / 2818 mV / I+Q ONDE
 24881 UI / 3796 mV / I-Q 1/2 ONDE
 20778 UI / 3170 mV / I+V 3/4 ONDE
 32110 UI / 4899 mV / I-V 1/4 ONDE
 16282 UI / 2484 mV / I-V 5/4 ONDE

WL=515

16831 UI / 2568 mV / I+Q ONDE
 23007 UI / 3510 mV / I-Q 1/2 ONDE
 19264 UI / 2939 mV / I+V 3/4 ONDE
 30116 UI / 4595 mV / I-V 1/4 ONDE
 14686 UI / 2241 mV / I-V 5/4 ONDE

WL=523

16621 UI / 2536 mV / I+Q ONDE
 22783 UI / 3476 mV / I-Q 1/2 ONDE
 19070 UI / 2909 mV / I+V 3/4 ONDE
 29869 UI / 4557 mV / I-V 1/4 ONDE
 14474 UI / 2208 mV / I-V 5/4 ONDE

WL=557

15800 UI / 2411 mV / I+Q ONDE
 21944 UI / 3348 mV / I-Q 1/2 ONDE
 18314 UI / 2794 mV / I+V 3/4 ONDE
 28915 UI / 4412 mV / I-V 1/4 ONDE
 13616 UI / 2077 mV / I-V 5/4 ONDE

WL=589

15121 UI / 2307 mV / I+Q ONDE
 21293 UI / 3249 mV / I-Q 1/2 ONDE
 17687 UI / 2698 mV / I+V 3/4 ONDE
 28127 UI / 4291 mV / I-V 1/4 ONDE
 12861 UI / 1962 mV / I-V 5/4 ONDE

WL=610

14716 UI / 2245 mV / I+Q ONDE
 20922 UI / 3192 mV / I-Q 1/2 ONDE
 17312 UI / 2641 mV / I+V 3/4 ONDE
 27651 UI / 4219 mV / I-V 1/4 ONDE
 12385 UI / 1889 mV / I-V 5/4 ONDE

WL=617

14588 UI / 2226 mV / I+Q ONDE
 20807 UI / 3174 mV / I-Q 1/2 ONDE
 17193 UI / 2623 mV / I+V 3/4 ONDE
 27497 UI / 4195 mV / I-V 1/4 ONDE
 12229 UI / 1866 mV / I-V 5/4 ONDE

WL=630

14358 UI / 2190 mV / I+Q ONDE
 20600 UI / 3143 mV / I-Q 1/2 ONDE
 16978 UI / 2590 mV / I+V 3/4 ONDE
 27215 UI / 4152 mV / I-V 1/4 ONDE
 11940 UI / 1822 mV / I-V 5/4 ONDE

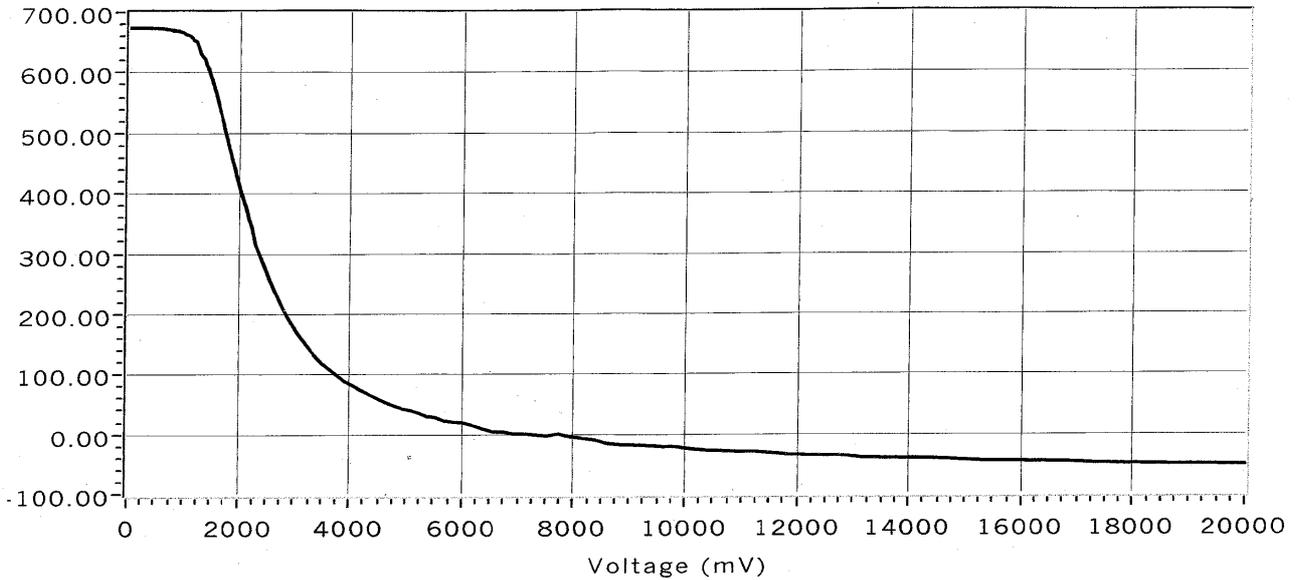
WL=656

13923 UI / 2124 mV / I+Q ONDE
 20213 UI / 3084 mV / I-Q 1/2 ONDE
 16571 UI / 2528 mV / I+V 3/4 ONDE
 26659 UI / 4067 mV / I-V 1/4 ONDE
 11369 UI / 1734 mV / I-V 5/4 ONDE

WL=715

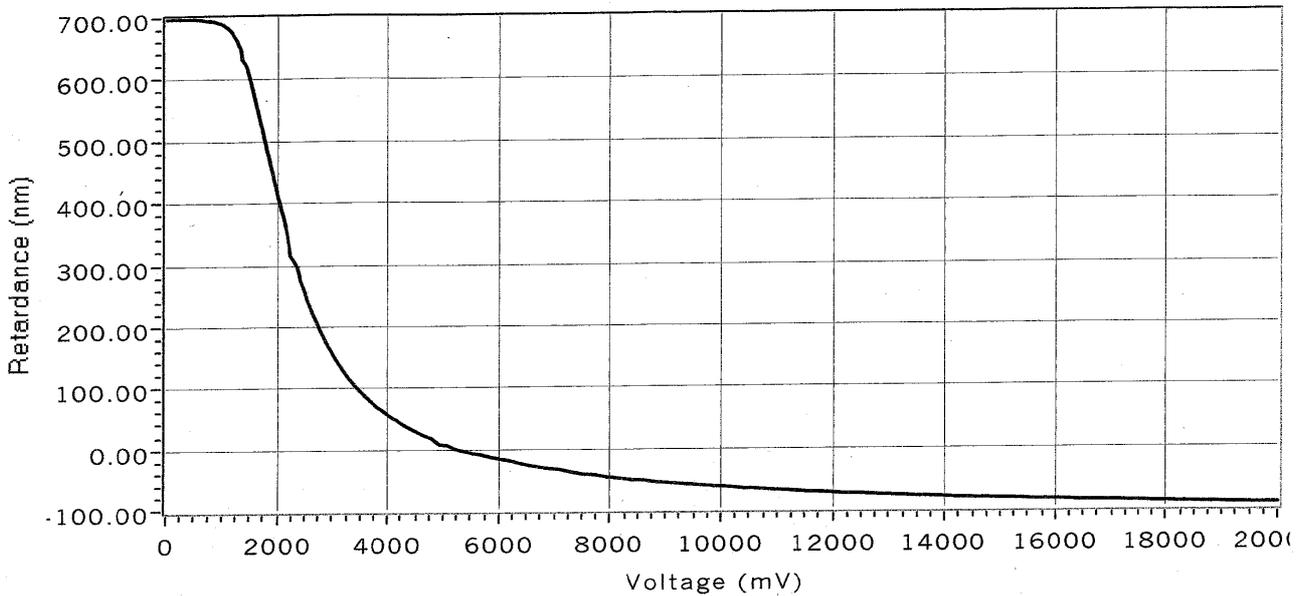
13033 UI / 1988 mV / I+Q ONDE
 19371 UI / 2955 mV / I-Q 1/2 ONDE
 15717 UI / 2398 mV / I+V 3/4 ONDE
 25341 UI / 3866 mV / I-V 1/4 ONDE
 10053 UI / 1534 mV / I-V 5/4 ONDE

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



Courbe retard/tension fournie par le constructeur, lame 8280

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



Courbe retard/tension fournie par le constructeur, lame 8253

Configuration à un seul cristal liquide : I+O, I-Q ou I+V, I-V en séquence

élément 1 = cristal nématique

élément 2 (lame 1/4 onde statique) absent:

modulation entre 0, $\lambda/2$, axes à 45° du polariseur: on mesure I+Q et I-Q

élément 2 (lame 1/4 onde statique) présent:

modulation entre $\lambda/4$, $3\lambda/4$, axes à 45° du polariseur: on mesure I+V et I-V

| |
|---|
| <p>Signal obtenu: $S = (1/2) (I + Q \cos\delta - V \sin\delta)$</p> |
|---|

Configuration à deux cristaux liquides : I+Q, I-Q, I+V, I-V, I+U, I-U en séquence

Retardateur 1 modulé entre 0, $\lambda/4$, axes parallèles ou orthogonaux au polariseur
 Retardateur 2 modulé entre 0, $\lambda/4$, $\lambda/2$, $3\lambda/4$, axes à 45° du polariseur

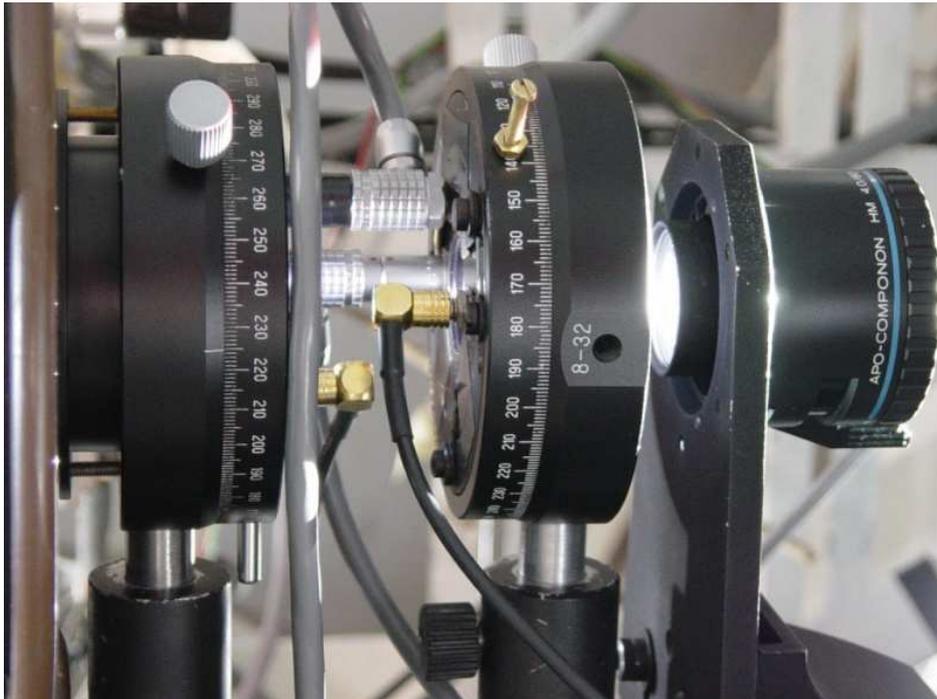
Retardateur 1 à 0 onde:

modulation du retardateur 2 entre 0, $\lambda/2$, $\lambda/4$, $3\lambda/4$: on mesure I+Q et I-Q, I+V et I-V

Retardateur 1 à 1/4 onde:

modulation du retardateur 2 entre $\lambda/4$, $3\lambda/4$: on mesure I+U et I-U

Signal mesuré: $S = (1/2) (I + Q \cos\delta_2 + \sin\delta_2 (U \sin\delta_1 - V \cos\delta_1))$



Polarimètre à deux cristaux liquides + polariseur. Le premier cristal est parallèle au polariseur de sortie. Le second cristal est tourné de 45° par rapport au polariseur.

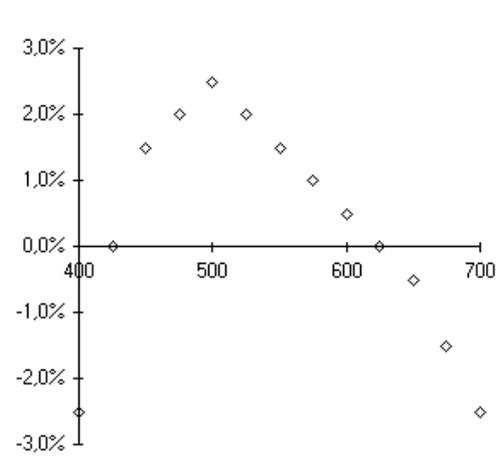
6 - LAMES STATIQUES ET POLARISEURS: COURBES DE REPONSE EN FONCTION DE LA LONGUEUR D'ONDE

Uniaxial materials, at 590 nm^[1]

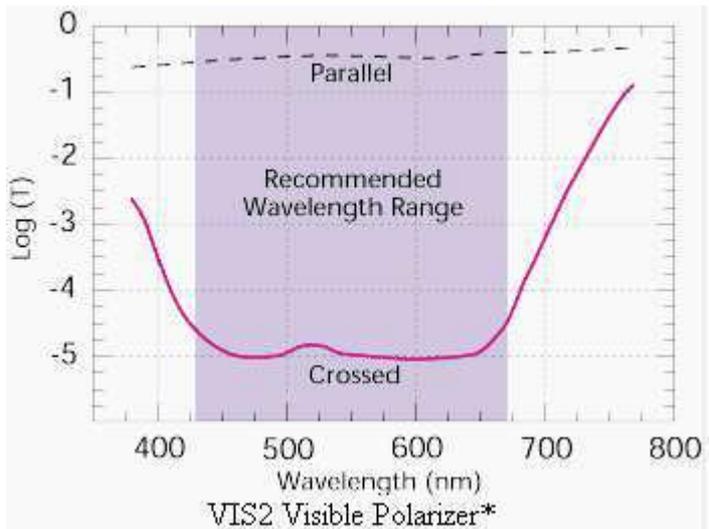
| Material | n_o | n_e | Δn |
|-------------------------------|-------|-------|------------|
| beryl $Be_3Al_2(SiO_3)_6$ | 1.602 | 1.557 | -0.045 |
| calcite $CaCO_3$ | 1.658 | 1.486 | -0.172 |
| calomel Hg_2Cl_2 | 1.973 | 2.656 | +0.683 |
| ice H_2O | 1.309 | 1.313 | +0.014 |
| lithium niobate $LiNbO_3$ | 2.272 | 2.187 | -0.085 |
| magnesium fluoride MgF_2 | 1.380 | 1.385 | +0.006 |
| quartz SiO_2 | 1.544 | 1.553 | +0.009 |
| ruby Al_2O_3 | 1.770 | 1.762 | -0.008 |
| rutile TiO_2 | 2.616 | 2.903 | +0.287 |
| peridot $(Mg, Fe)_2SiO_4$ | 1.690 | 1.654 | -0.036 |
| sapphire Al_2O_3 | 1.768 | 1.760 | -0.008 |
| sodium nitrate $NaNO_3$ | 1.587 | 1.336 | -0.251 |
| tourmaline (complex silicate) | 1.669 | 1.638 | -0.031 |
| zircon, high $ZrSiO_4$ | 1.960 | 2.015 | +0.055 |
| zircon, low $ZrSiO_4$ | 1.920 | 1.967 | +0.047 |

Valeurs des indices de réfraction (à $\lambda = 590$ nm) ordinaires n_o et extraordinaires n_e pour quelques cristaux

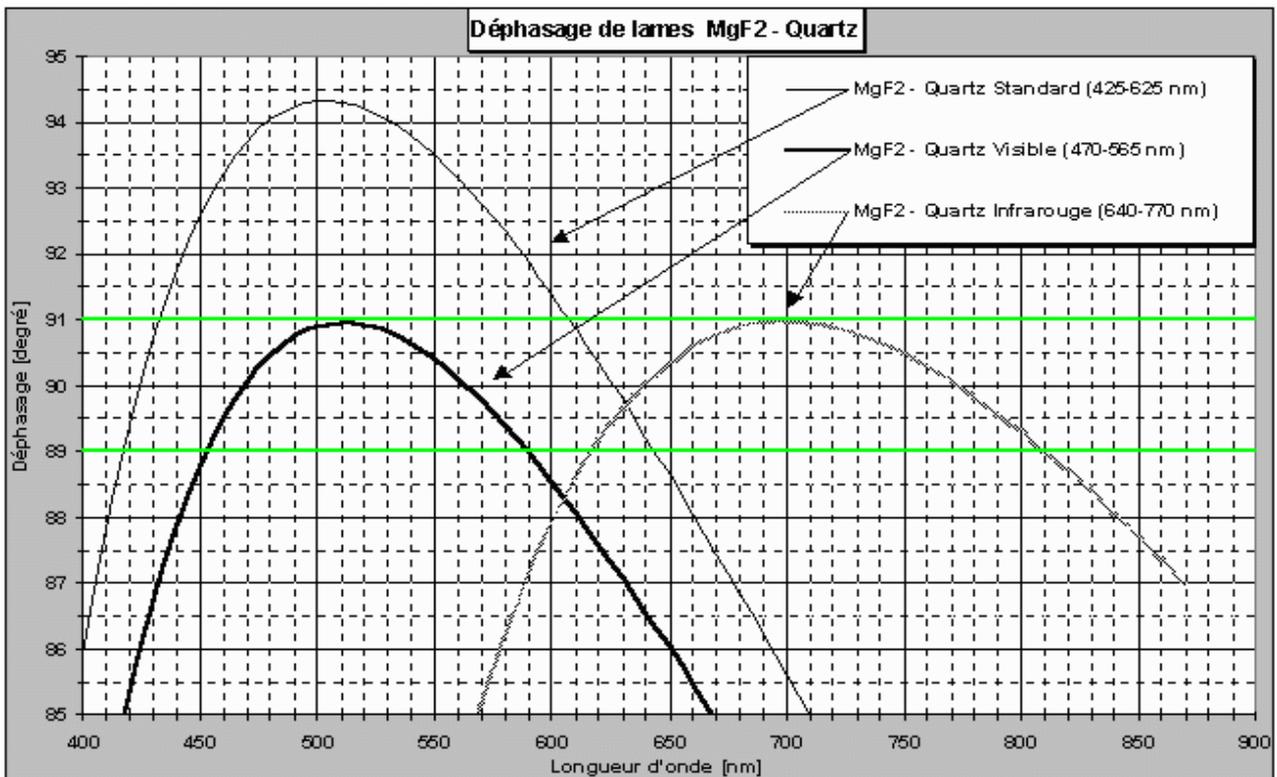
Retard de phase entre les rayons ordinaire / extraordinaire : $\delta = 2 \pi e (n_o - n_e) / \lambda$



Variation du déphasage en % suivant λ
Retardation variation in % according to λ



Chromaticité des lames Fichou (à gauche) et extinction des polariseurs Meadowlark (à droite) en fonction de la longueur d'onde



Chromaticité des lames de quartz quart d'onde Fichou en fonction de la longueur d'onde