

Spectro polarimétrie à la lunette Jean Rösch au Pic du Midi II - Etat des lieux

*Malherbe J.-M., Roudier Th., Moity J., Arnaud J., Müller R., Mein P., Bommier V.,
Faurobert M., Derouich M., Rondi S., Semel M., Frisch H., Coutard Ch.*





Observatoire de Paris – Observatoire Midi Pyrénées



La lunette

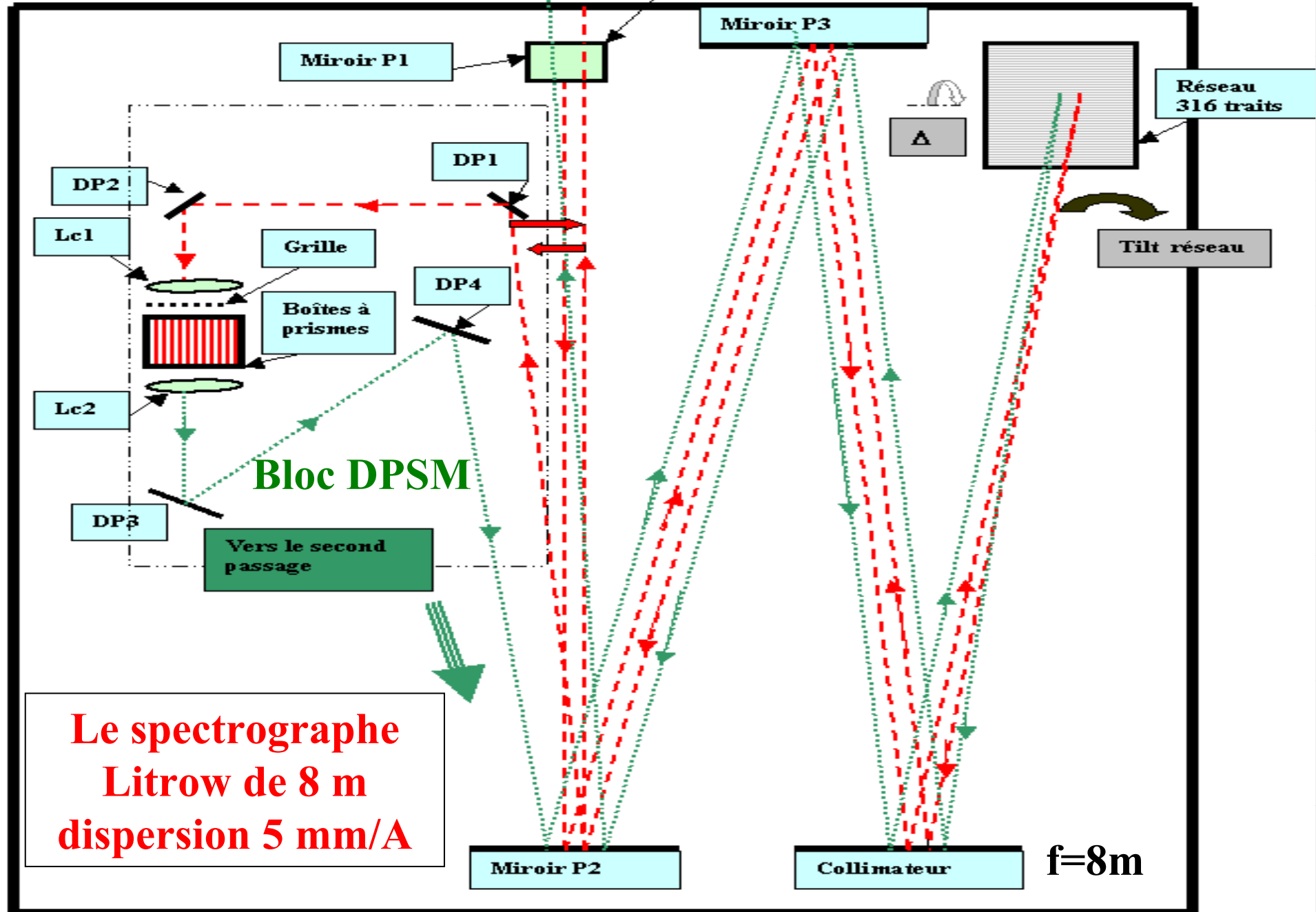
**Le spectro
« Mouradian »**

Table équatoriale



Faisceau DPSM

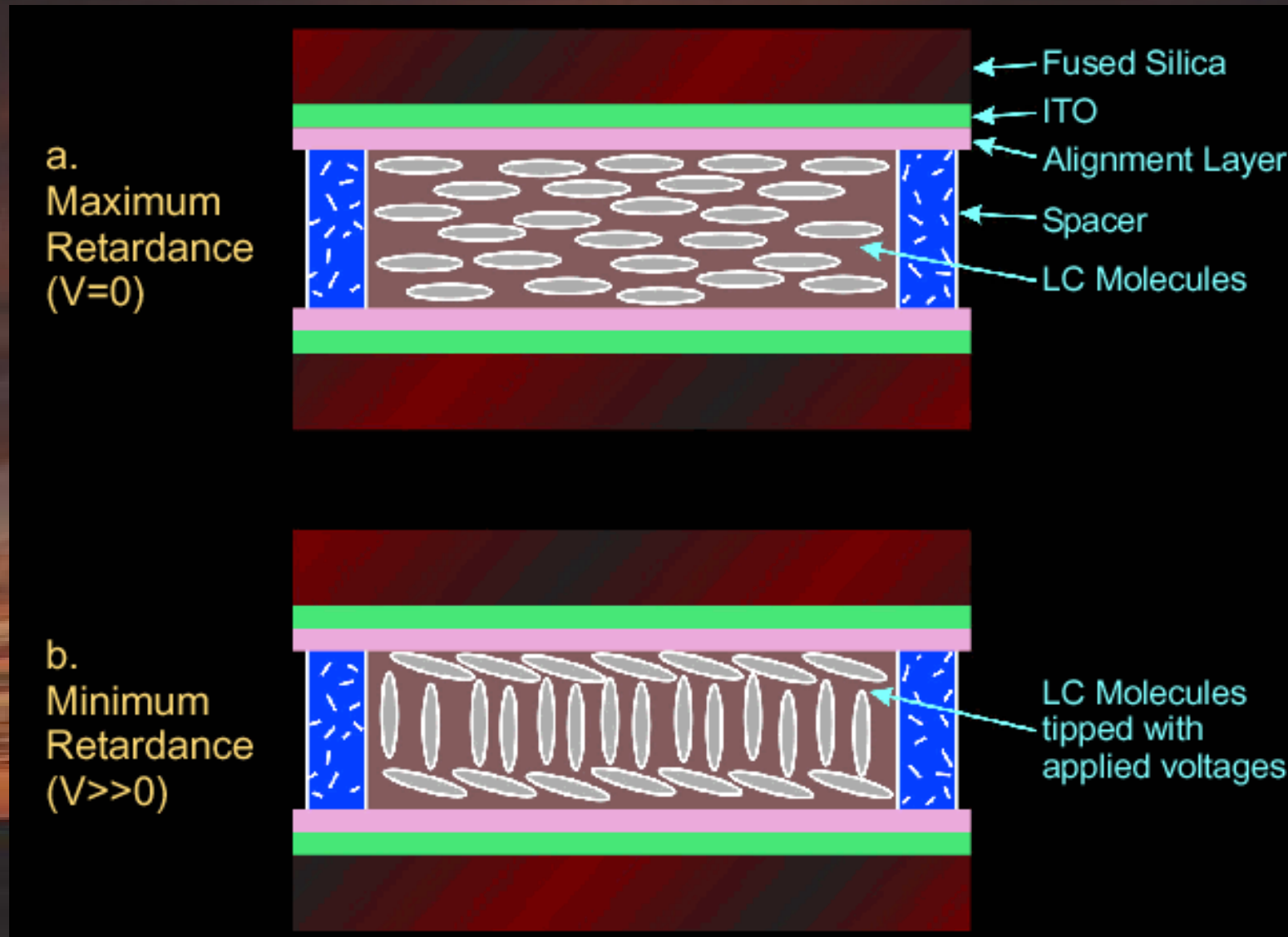
Faisceau SP



**Le spectrographe
Litrow de 8 m
dispersion 5 mm/Å**

Polarimétrie avec les retardateurs à cristaux liquides

Principe

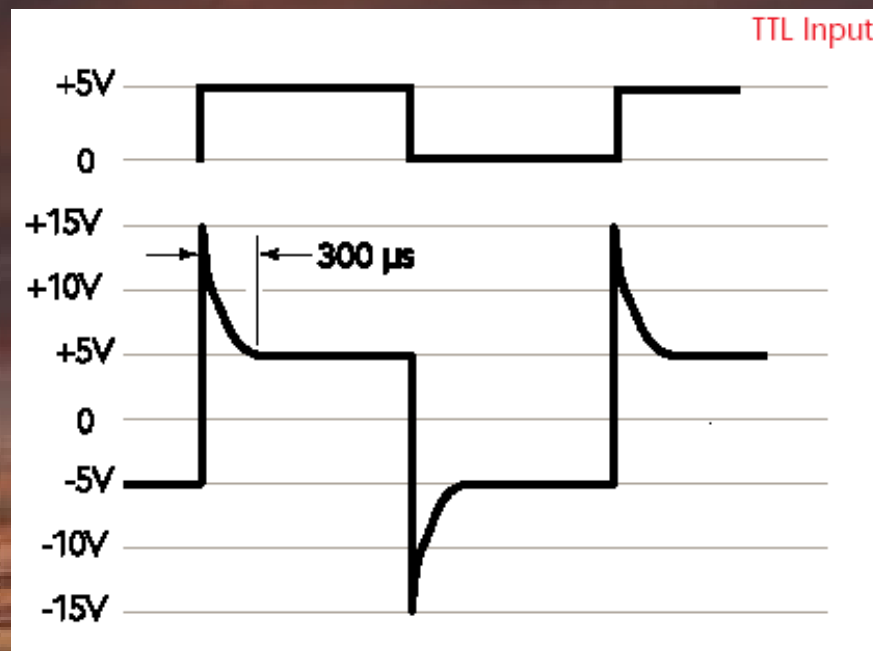


FLC Ferroelectric Liquid Crystal

Rotateur de polarisation DISPLAYTECH « achromatique »

2 états correspondant à +5 V et -5 V

Vitesse de modulation: plusieurs KHz



Tension appliquée aux cristaux FLC: tension continue + transitoire pour accélérer la transition entre les deux états

NLC Nematic Liquid Crystal

Lames à retard variable entre 0 et 800 nm (0 à $\frac{3}{4}$ onde)

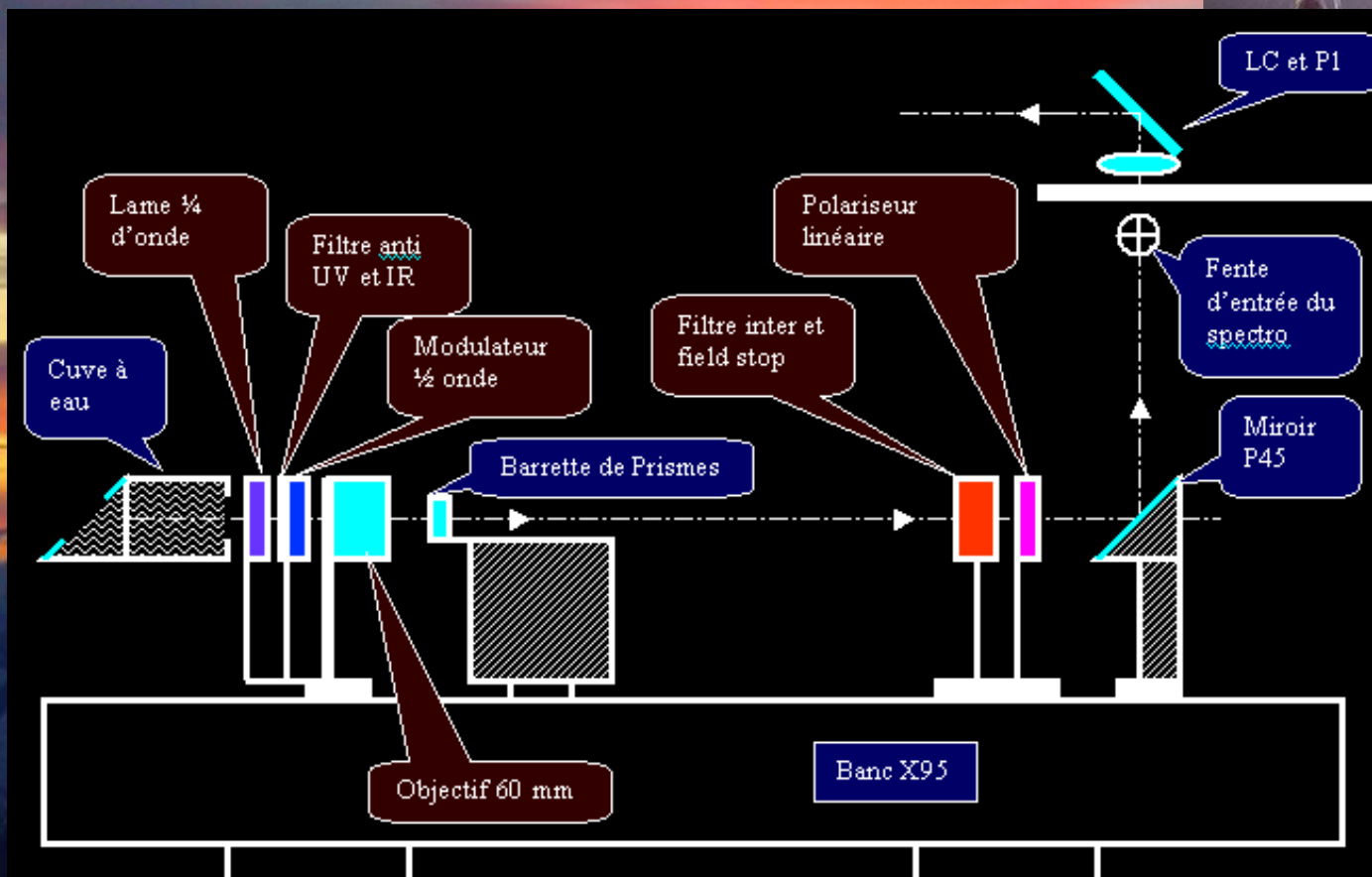
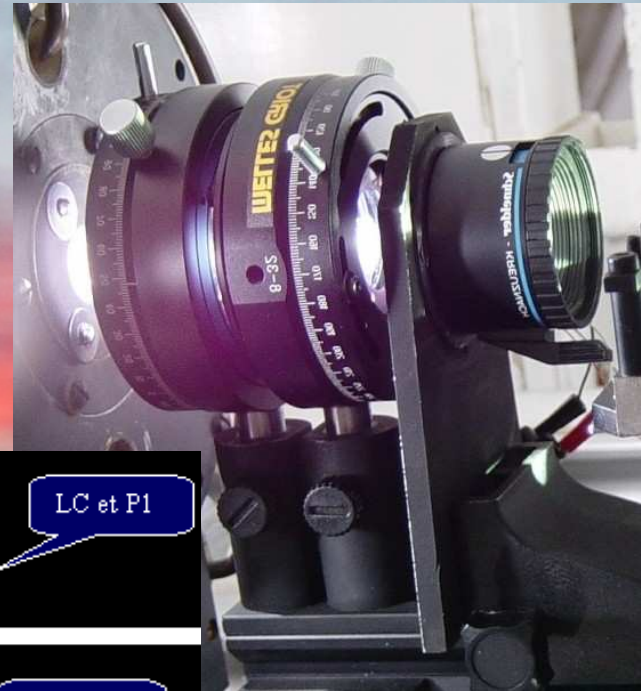
Vitesse de modulation: quelques dizaines de Hz seulement

Polarimètre PdM1, technologie FLC

Modulateur $\frac{1}{2}$ onde et lame statique $\frac{1}{4}$ onde

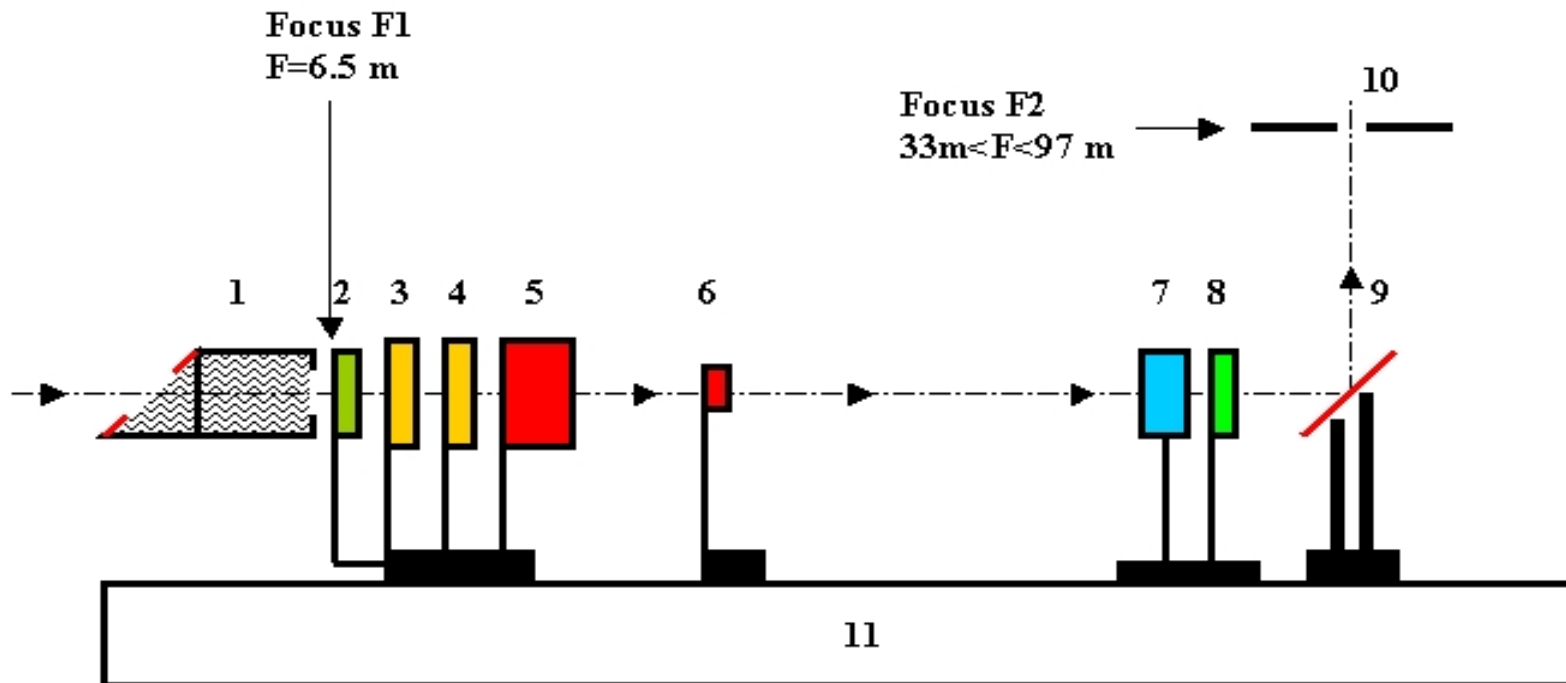
Mesure de I+Q et I-Q en séquence *ou*

Mesure de I+V et I-V en séquence



Polarimètre PdM2: 2 modulateurs NLC à retard variable

Mesure de I+Q, I-Q, I+U, I-U, I+V et I-V en séquence



1: water cooling device (field stop)

2: UV/IR filter 390-700 nm

3: variable retarder 1

4: variable retarder 2

5: magnification lens (f=40/60/95 mm)

6: beam shifter and flat field lenses (MSDP only)

7: interference filter

8: precision dichroic linear polarizer

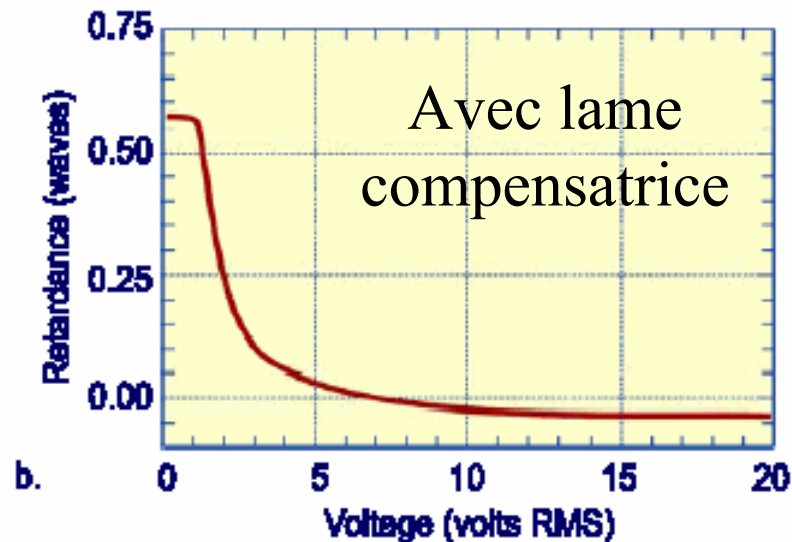
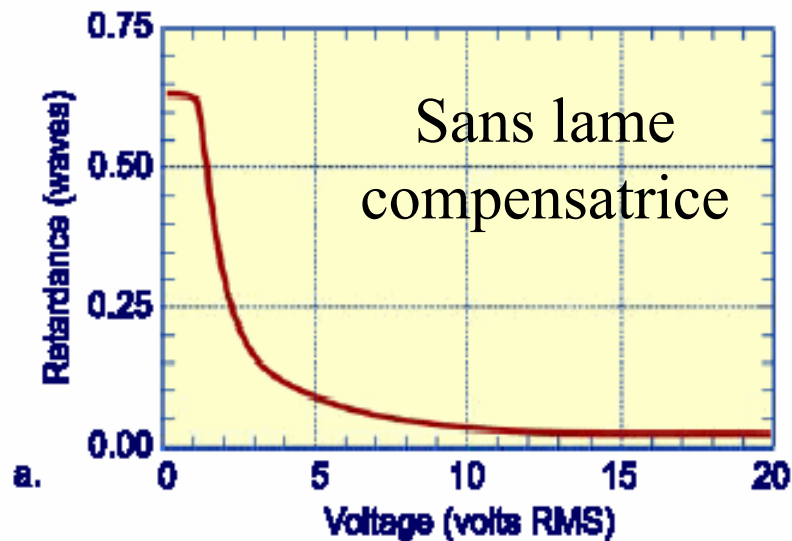
9: flat mirror

10: spectrograph entrance slit

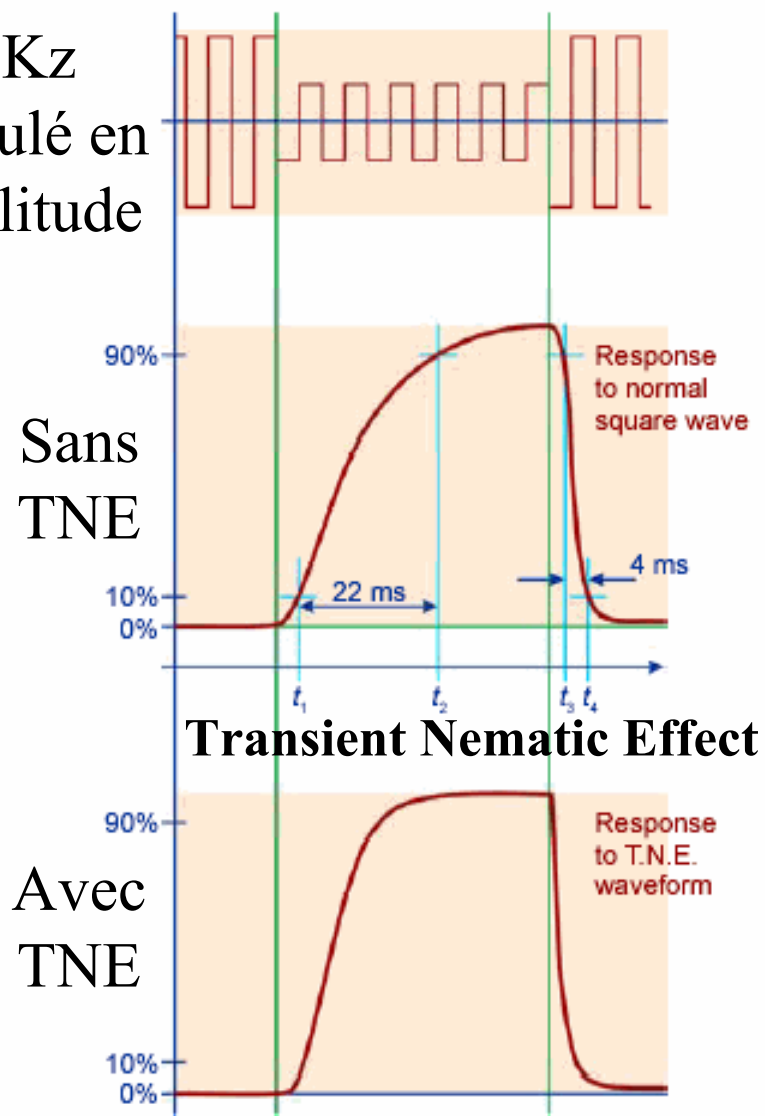
11: optical rail

Polarimètre PdM2: 2 modulateurs NLC à retard variable

Relation retard/tension des cristaux nématiques



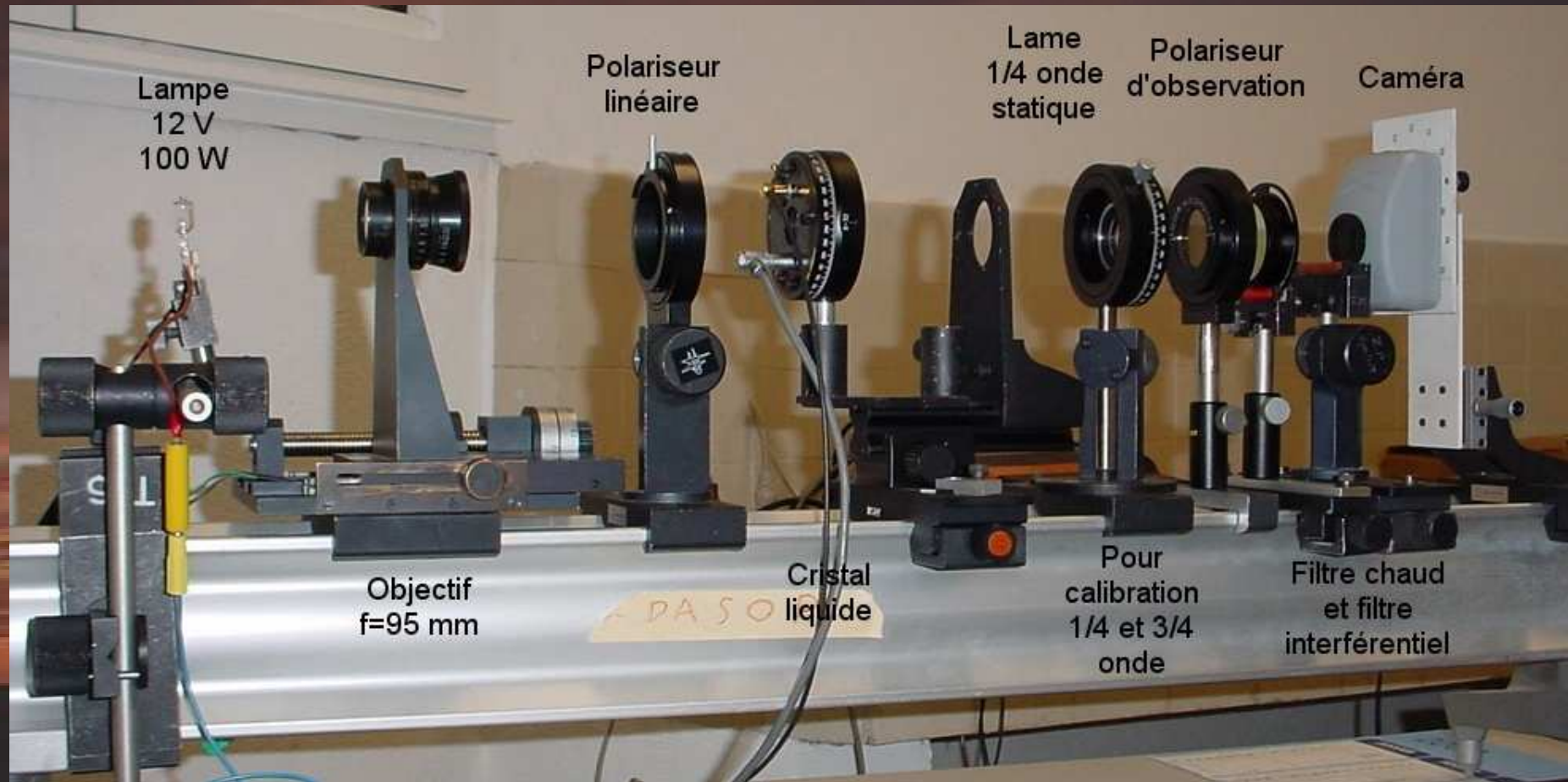
2 Kz
modulé en
amplitude



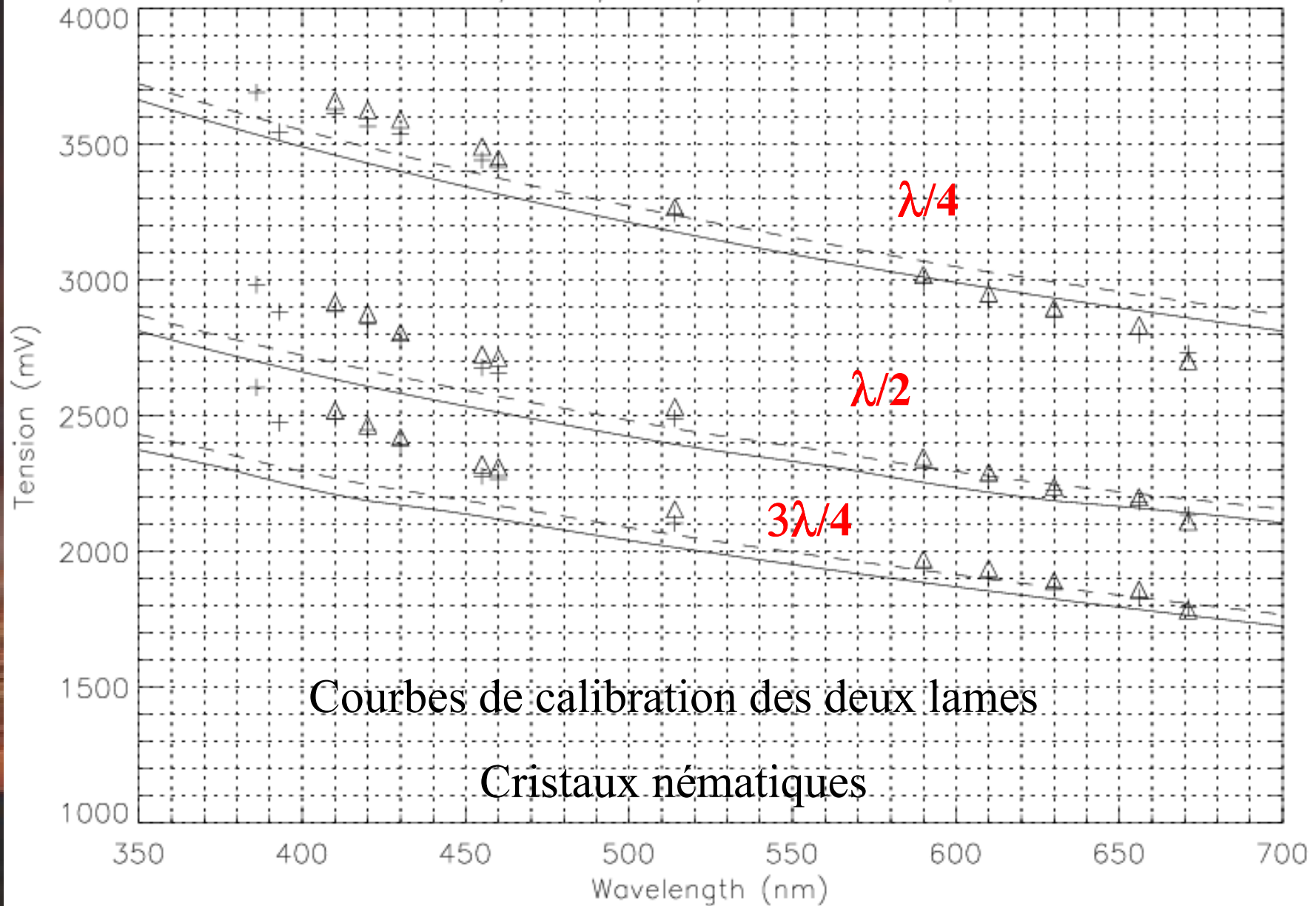
Le banc de calibration optique avec acquisition numérique

Calibration 0 et $\lambda/2$ entre polariseurs linéaires

Calibration $\lambda/4$ et $3\lambda/4$ avec une quart d'onde Fichou achromatique



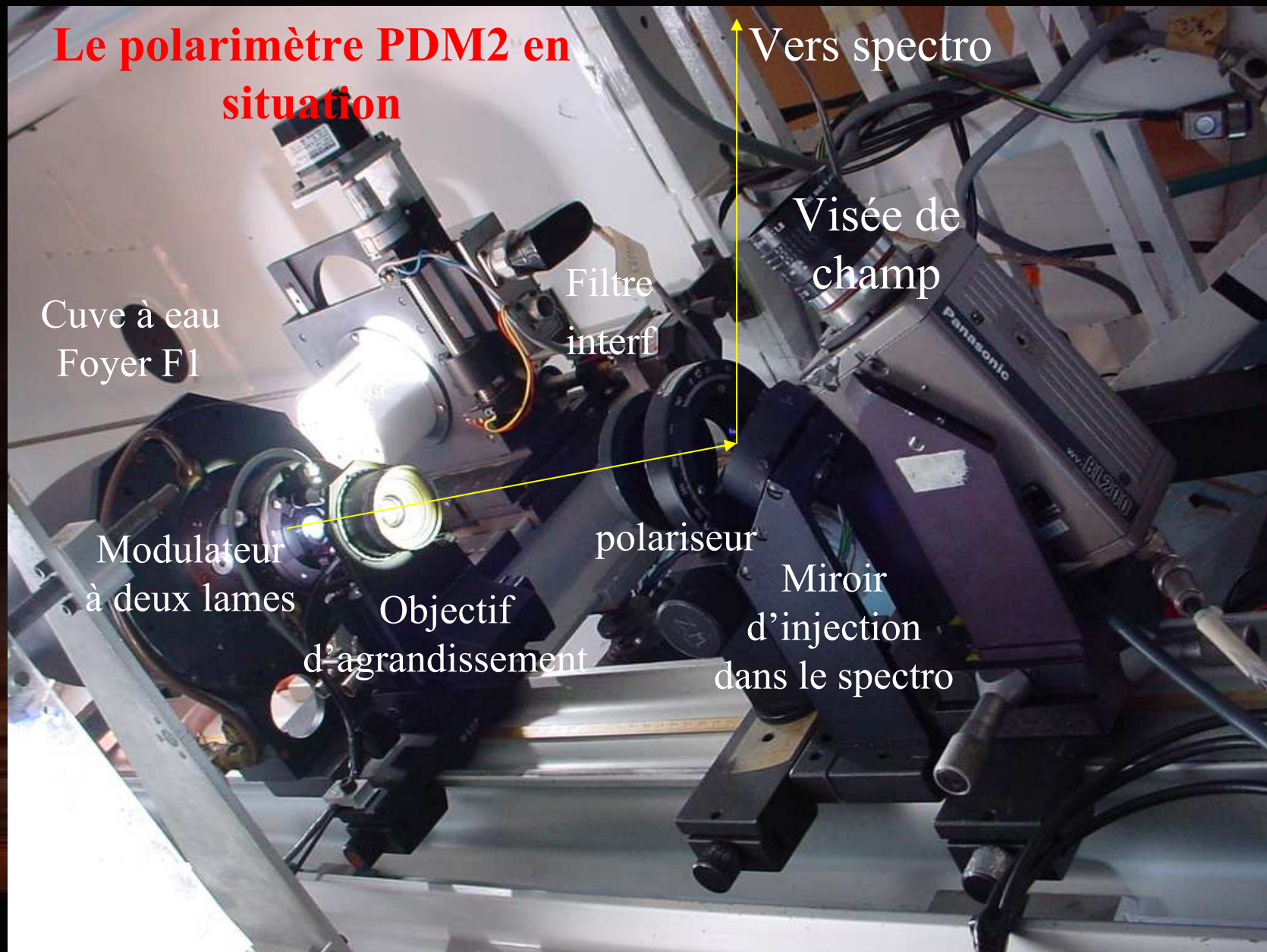
FLC Polarimeter, 1/4, 1/2, 3/4 wave, Temperature = 20.0



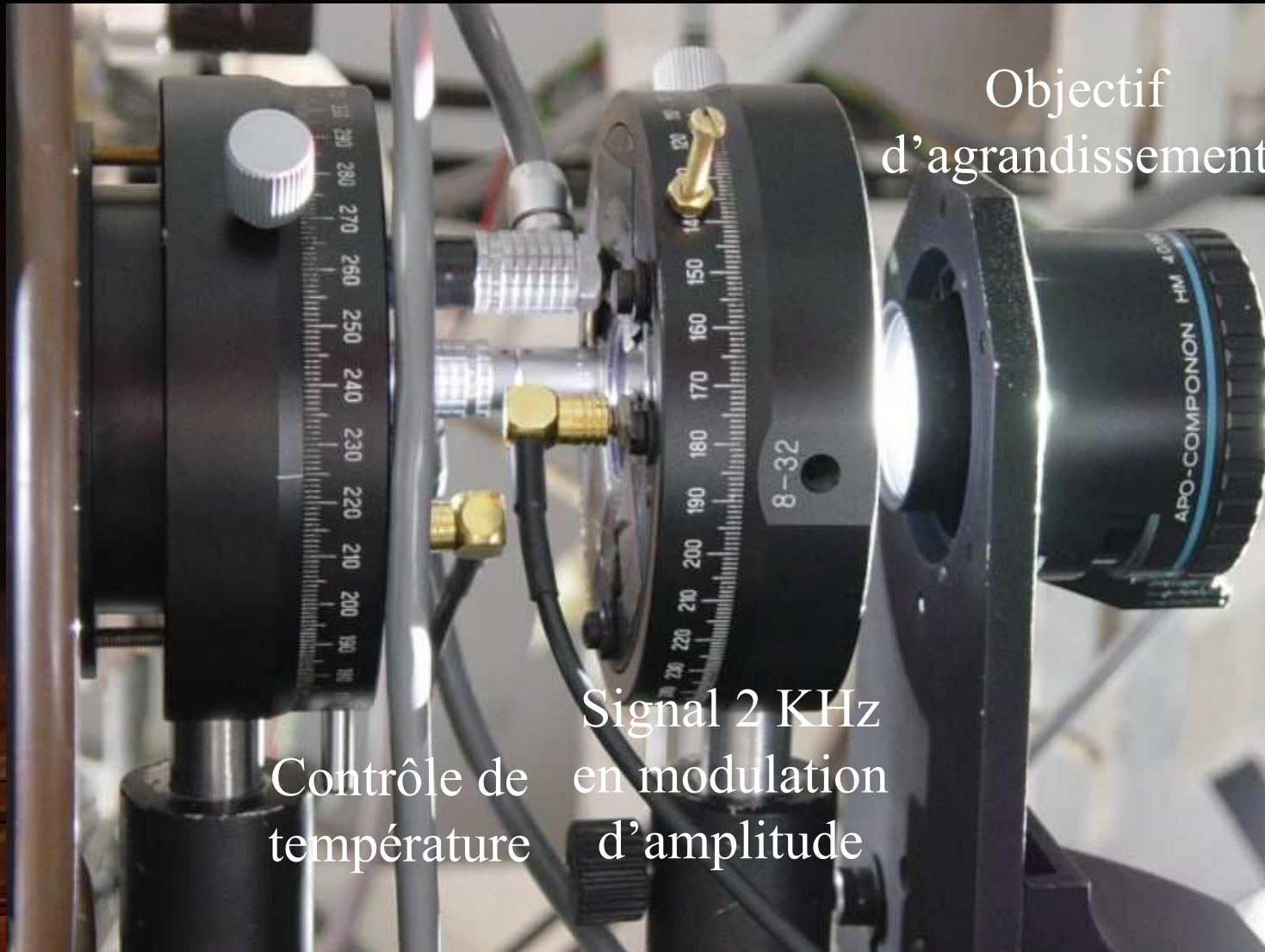
Courbes de calibration des deux lames

Cristaux nématiques

Le polarimètre PDM2 en situation



$$S = I + Q \cos\delta_2 + \sin\delta_2 (U \sin\delta_1 - V \cos\delta_1)$$



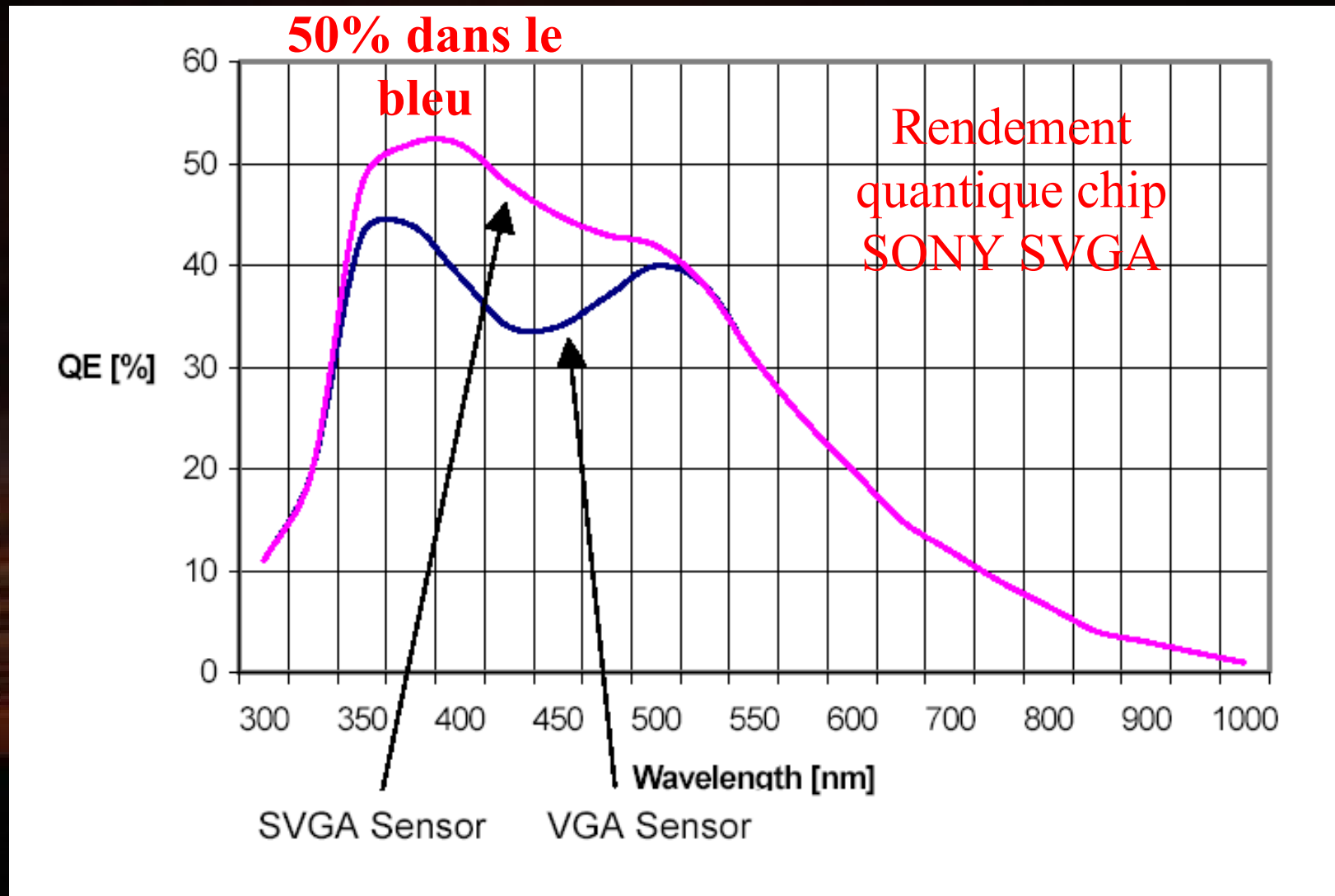
Objectif
d'agrandissement

Signal 2 KHz
en modulation
d'amplitude

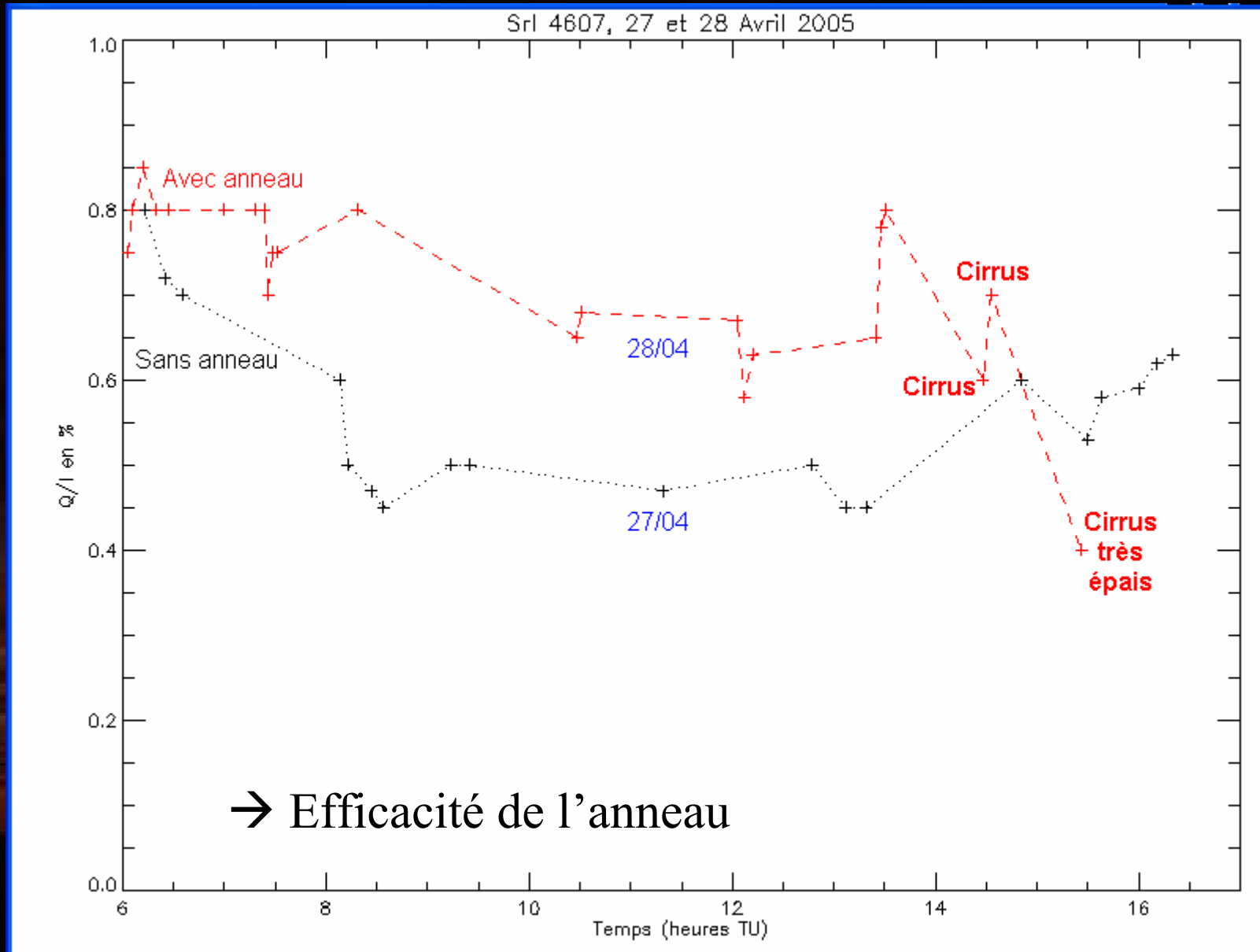
Contrôle de
température

Polarimètre PDM2 à deux lames retardatrices (cristaux nématiques)
 $S = I + Q \cos\delta_2 + \sin\delta_2 (U \sin\delta_1 - V \cos\delta_1)$

Caméra CCD 12 bits, 12 MHz, 1280 x 1024, puits de potentiel de 25000 électrons, pixels de 6.7 μ , obturateur électronique, entrelacement zone mémoire/zone sensible, micro lentilles, FF 70%



Contrôle des effets instrumentaux sur la polarisation de SrI 4607



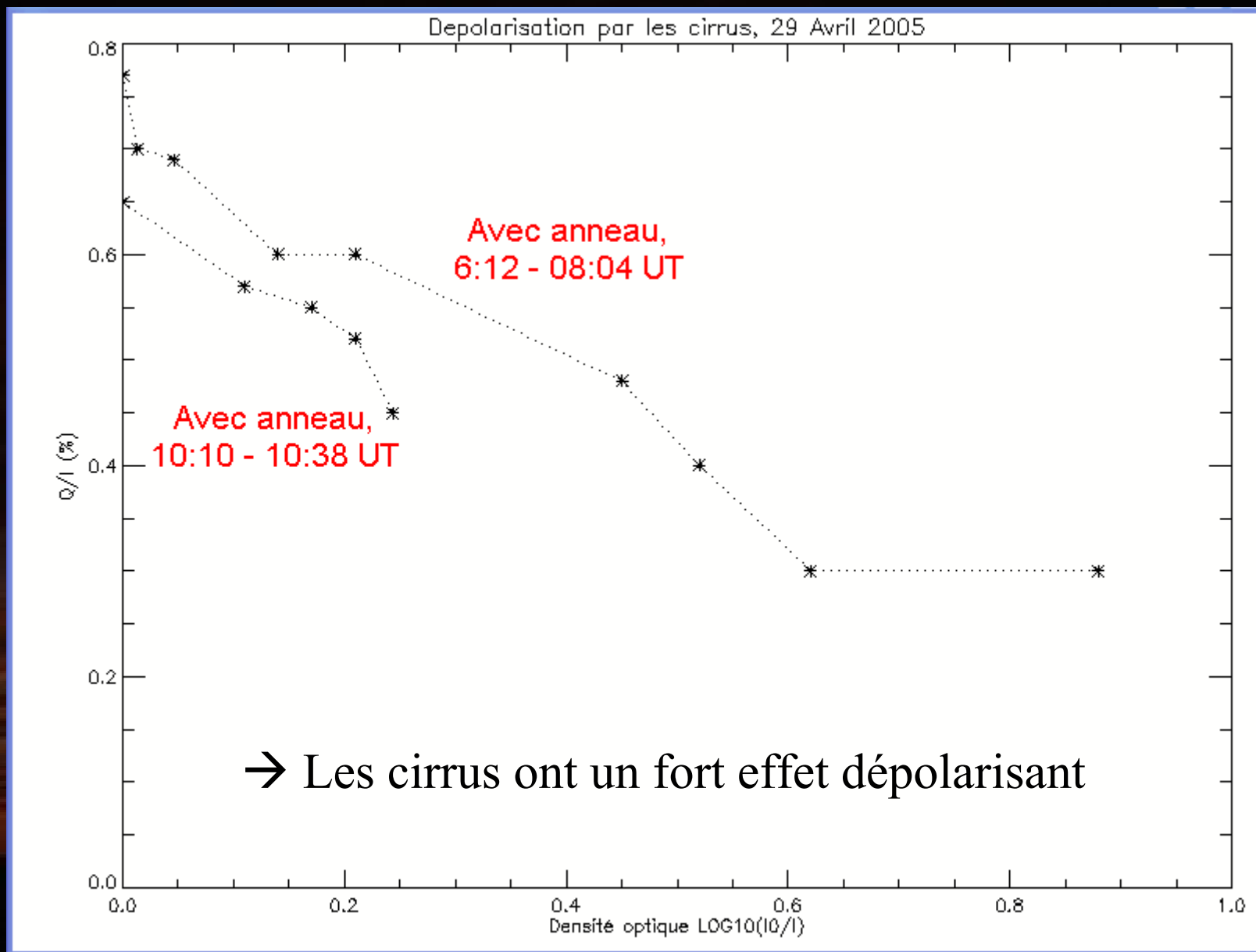
Anneau de Mehltreter

(empêche l'exposition au soleil du barillet de l'objectif de 50 cm)

- Gain en contraste
- Mise au point stable
- Limite la dépolarisation



Mesure de dépolarisation par les cirrus





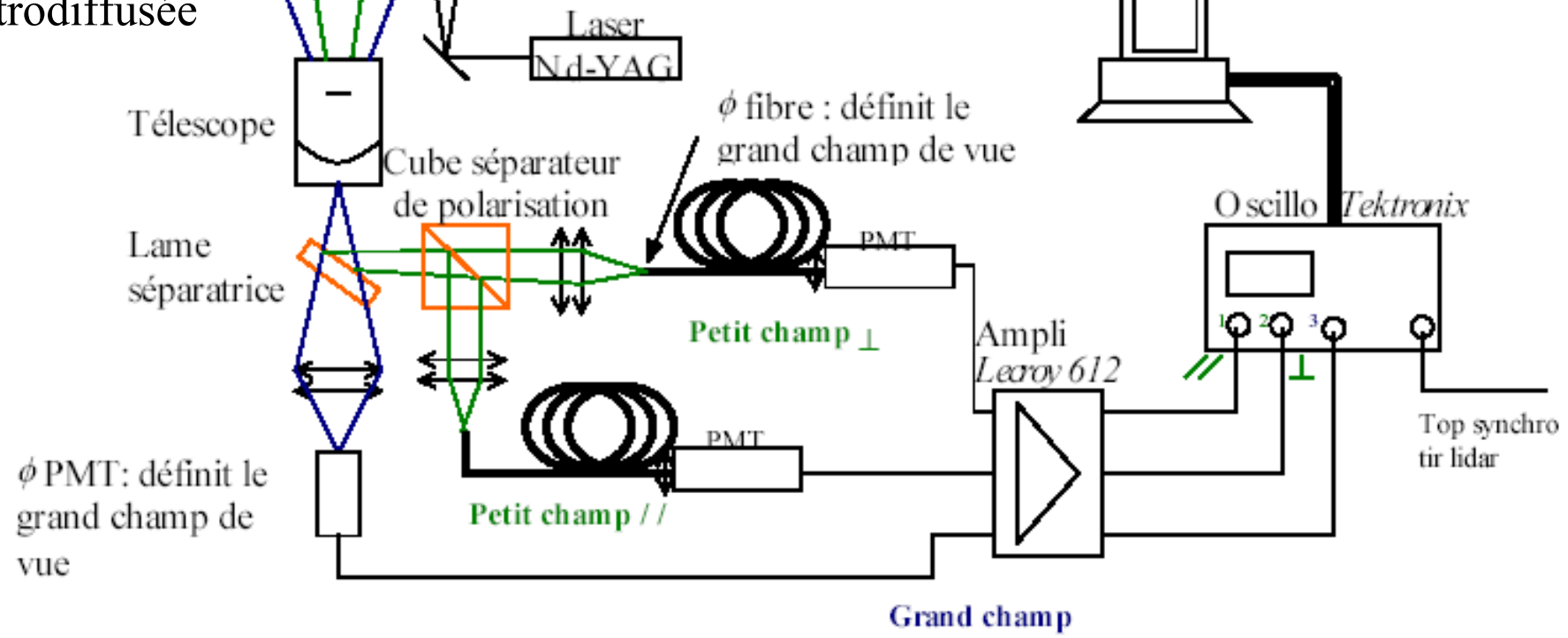
CIRRUS

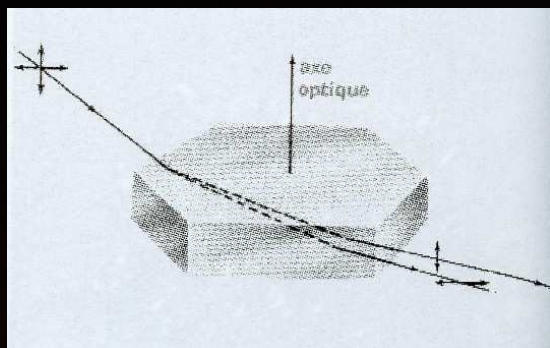
Mesures de dépolarisation par les cirrus



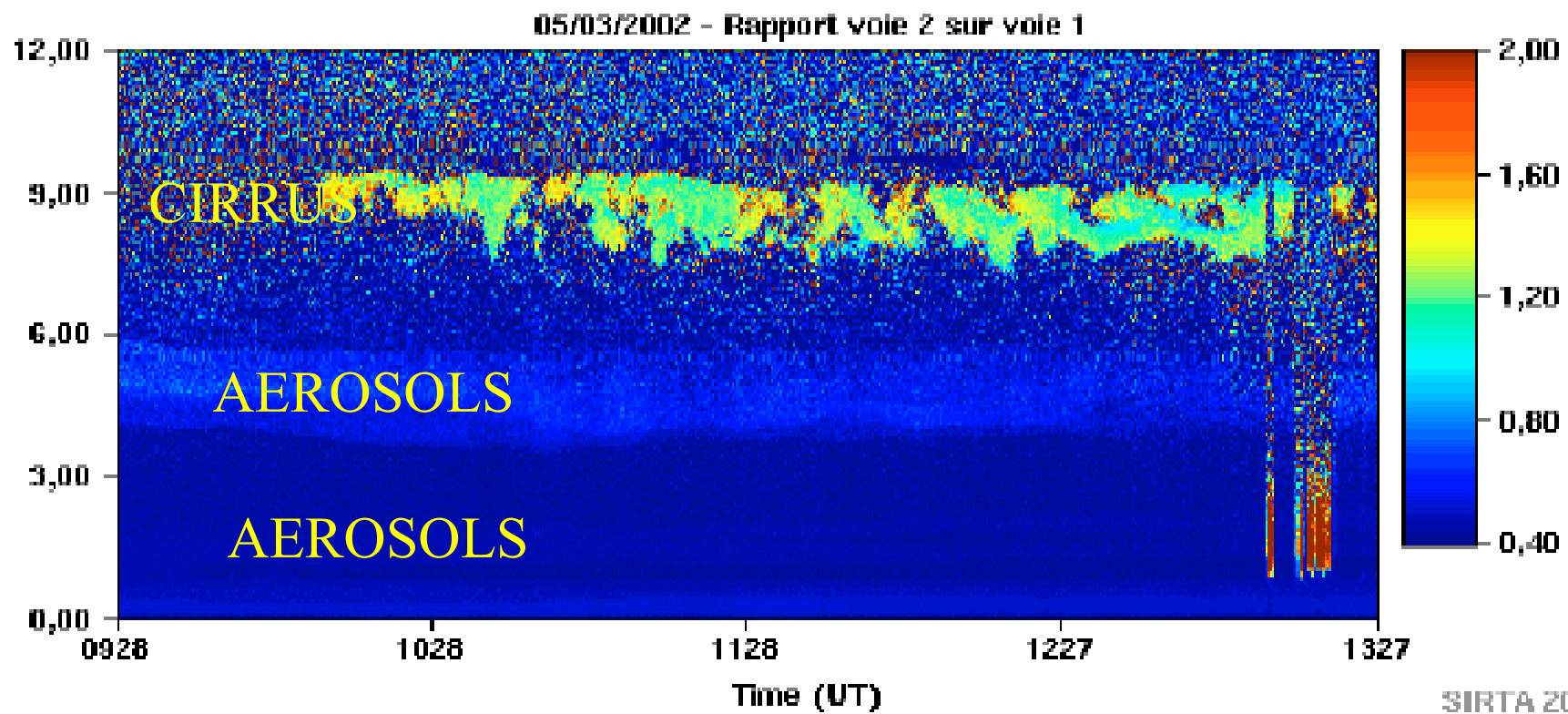
Observation de la lumière rétrodiffusée

Tir laser 532 nm polarisé linéairement





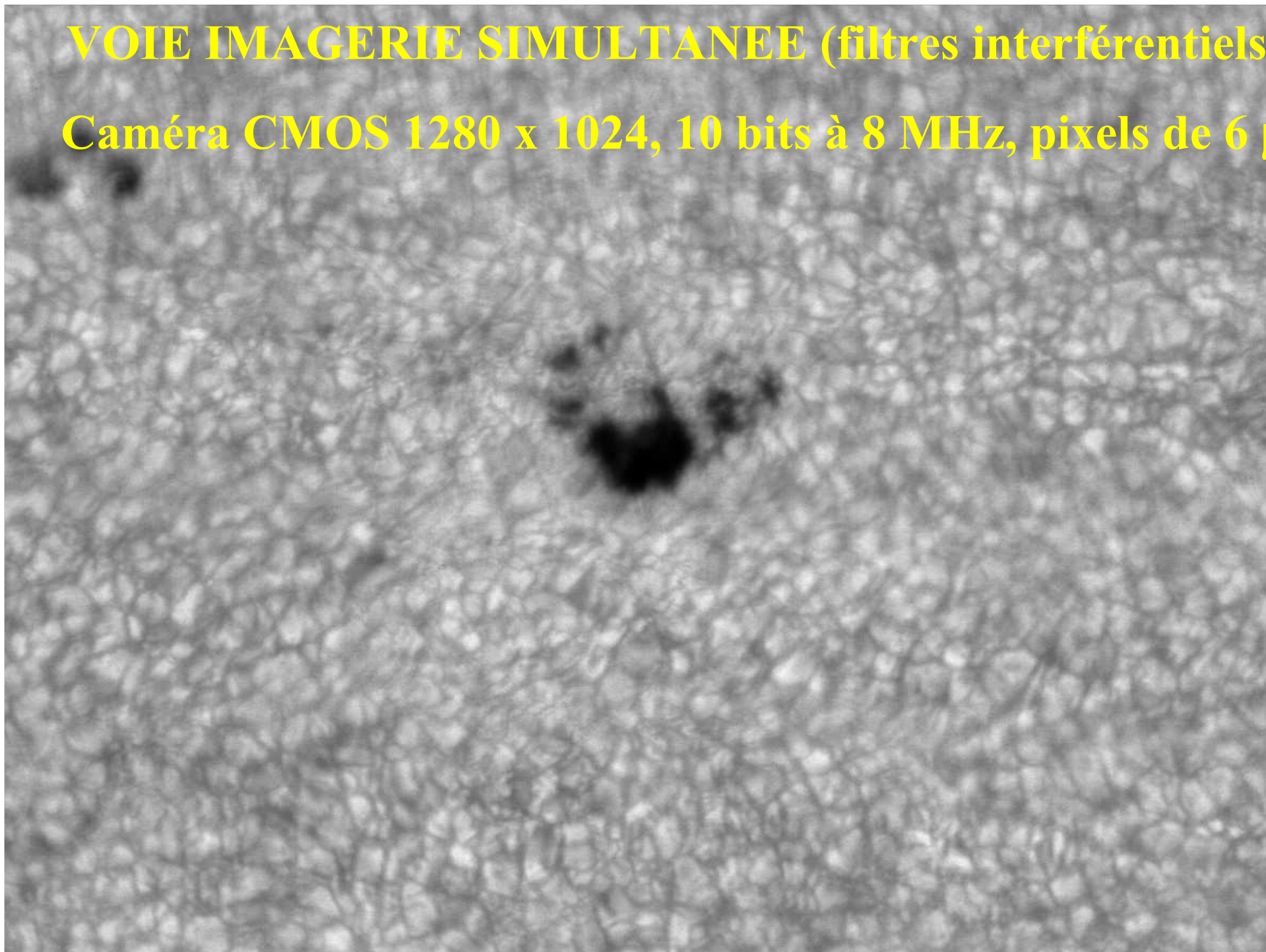
Mesure de la dépolariisation par les cirrus par analyse de la polarisation de la lumière laser rétrodiffusée



SIRTA 2002

VOIE IMAGERIE SIMULTANEE (filtres interférentiels)

Caméra CMOS 1280 x 1024, 10 bits à 8 MHz, pixels de 6 μ m



Quantum Efficiency

**Rendement quantique
caméra chip Kodak SVGA
CMOS**

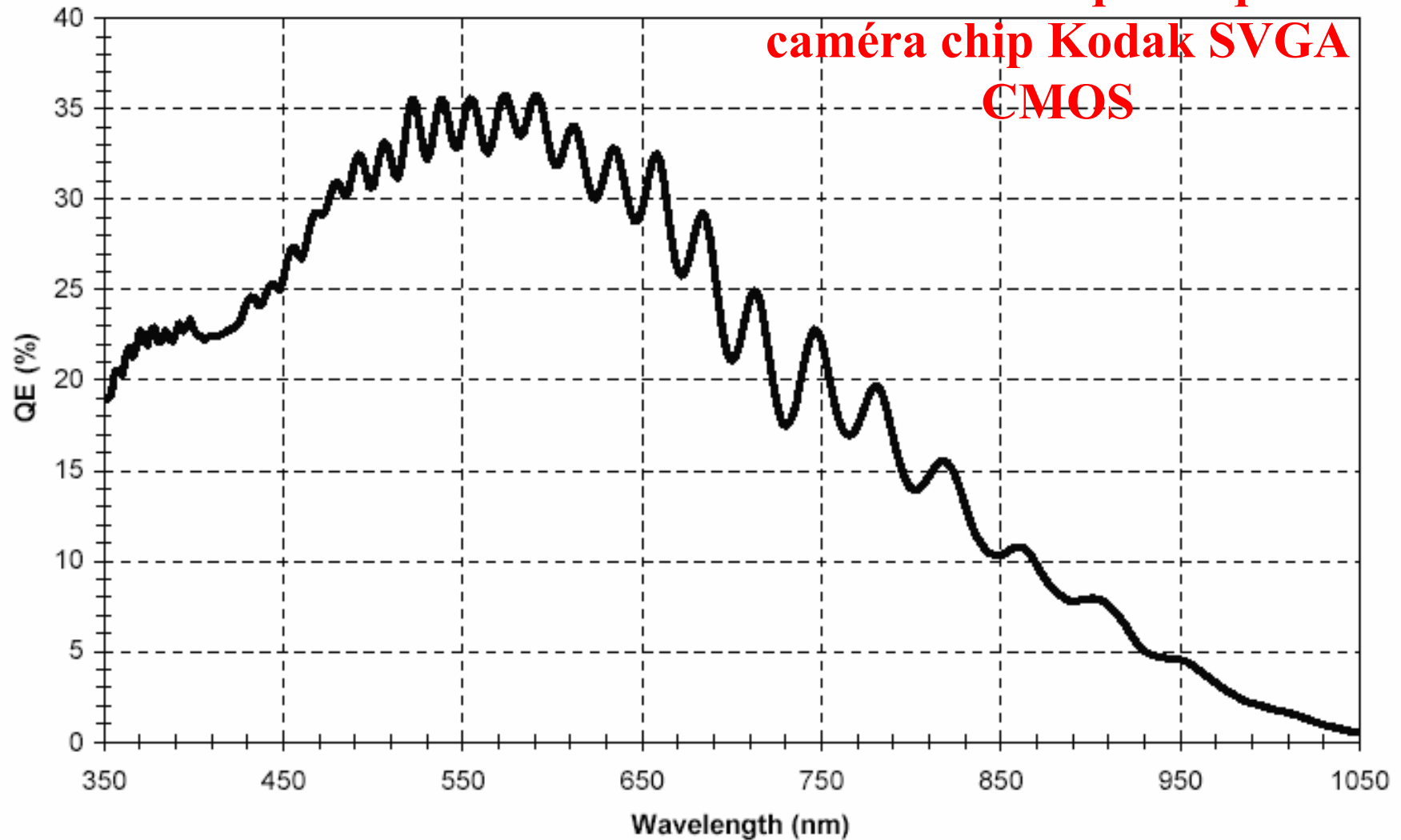
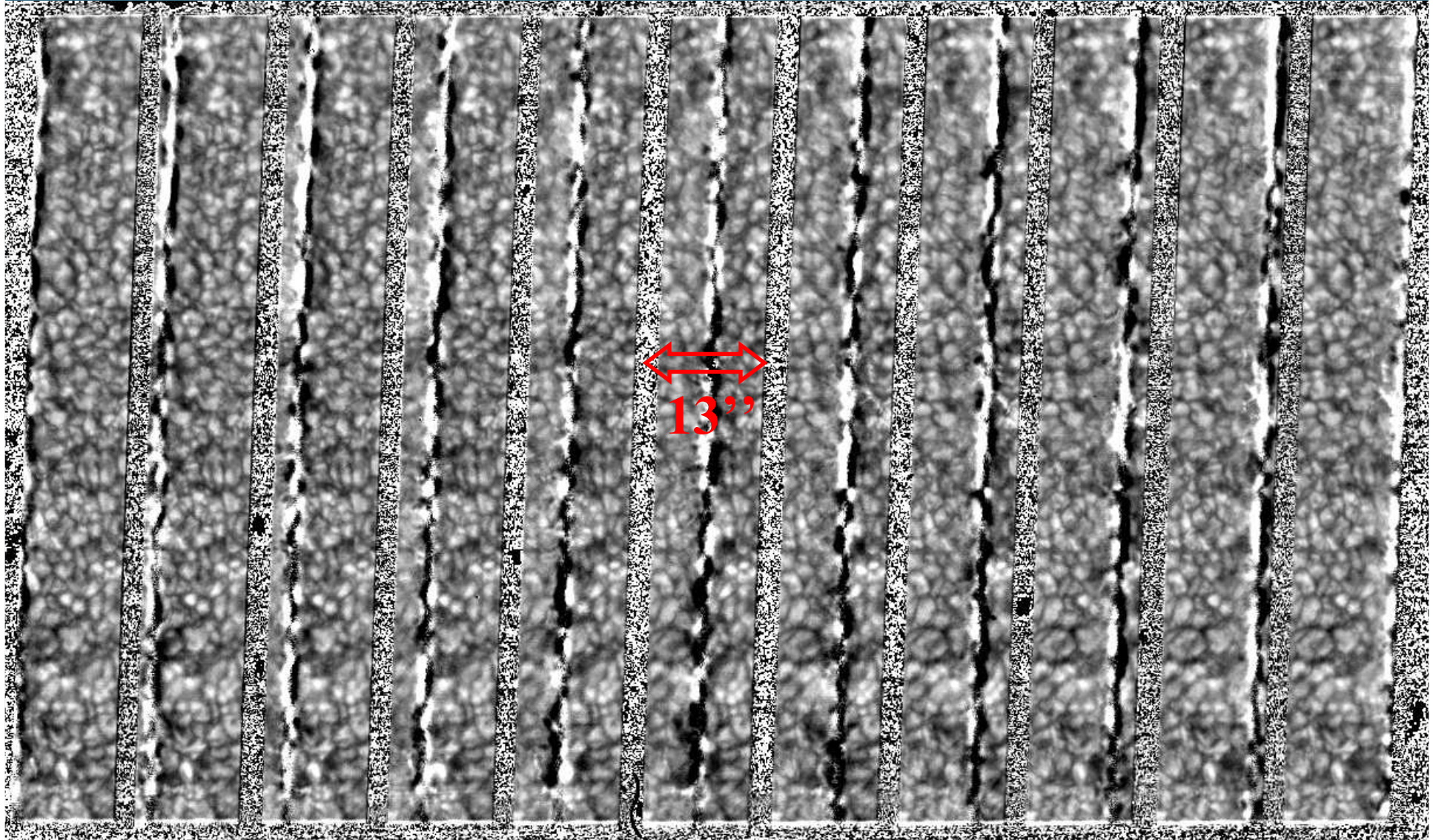


Figure 14: KAC-1310 Typical Monochrome Spectral Response

Spectro imagerie DPSM 11 canaux, NaD1, Oct 2002, 0.13''/pixel



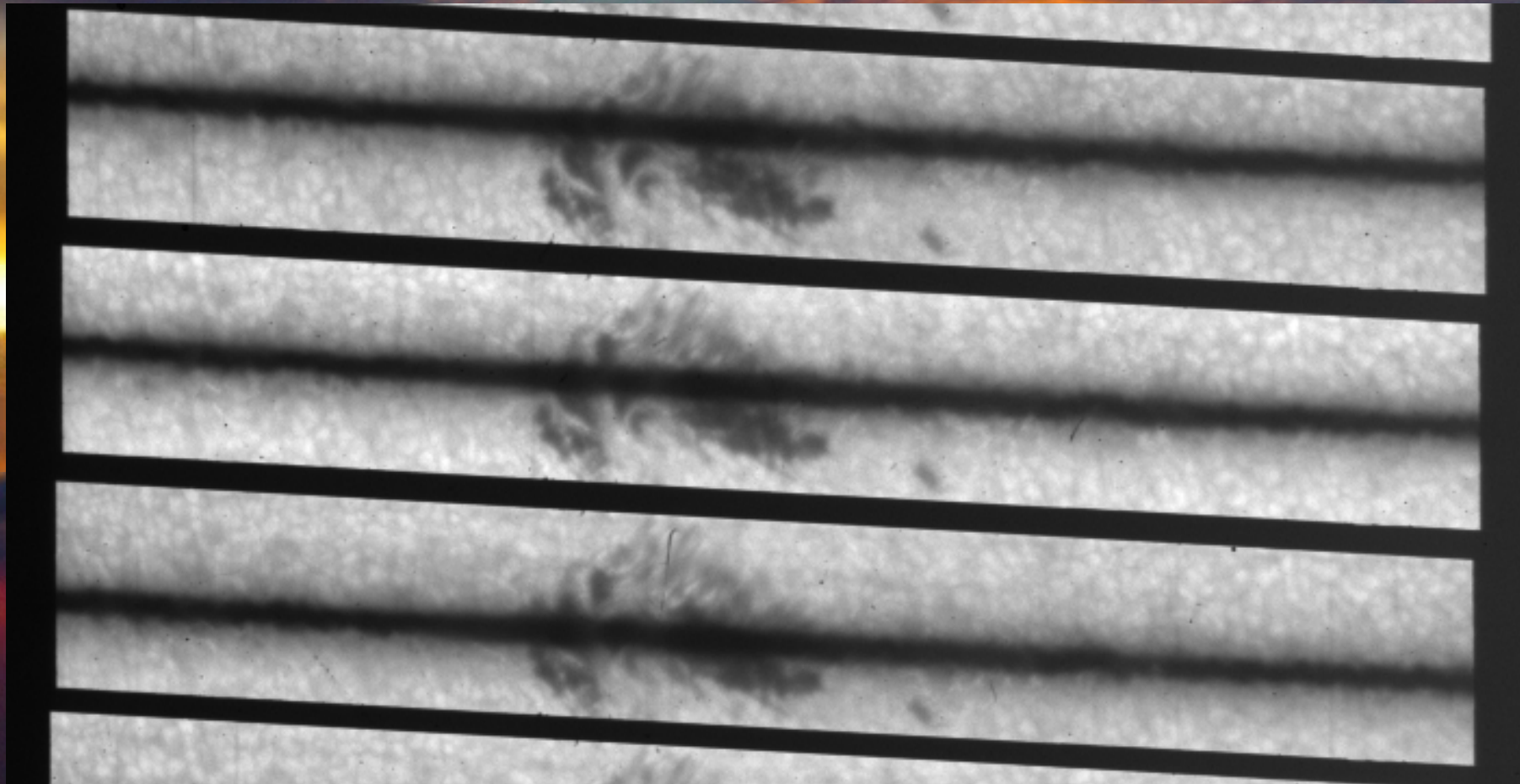
DPSM NaD1, Oct 2002, 0.13''/pixel, « continu » et centre raie



6''

DPSM polarimétrique NaD1 Oct 2003

Oscillations de la raie (effet Zeeman), I+V, I-V alternatifs



Recentrage et correction de distorsion entre les images du continu issus des couples I+V et I-V

Continus non
recentrés

Continus
recentrés

Décalages entre
I+V et I-V

20''

Application du recentrage aux décalages Doppler

Somme des décalages = $V_{||}$

Différence des décalages = $B_{||}$

Intensité @ 144 mA

20 ''

B// @ 144 mA

$\sigma = 60 \text{ G}$

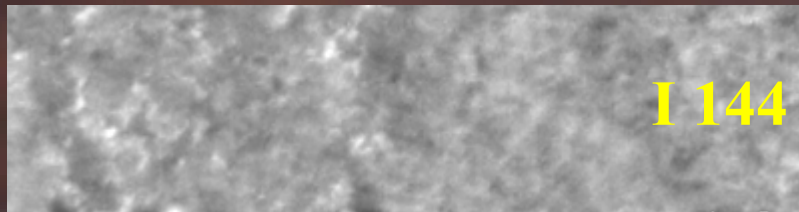
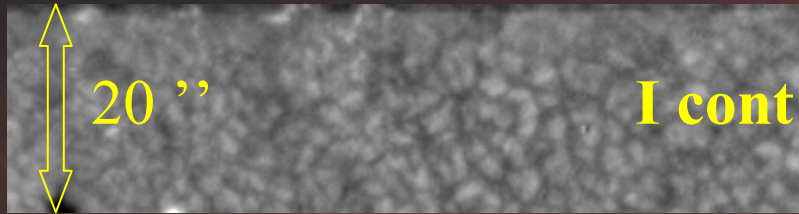
B// après « distretching » d'une rafale de 10 couples @ 144 mA

$\sigma = 28 \text{ G}$

B// après « distretching » rafale de 10 couples @ 144 mA et 288 mA

$\sigma = 28/57 \text{ G}$

Quantification des concentrations de champ magnétique



région magnétique

région calme

Diagnostic en altitude

à 144 mA (basse chromosphère):
Points brillants dans la raie

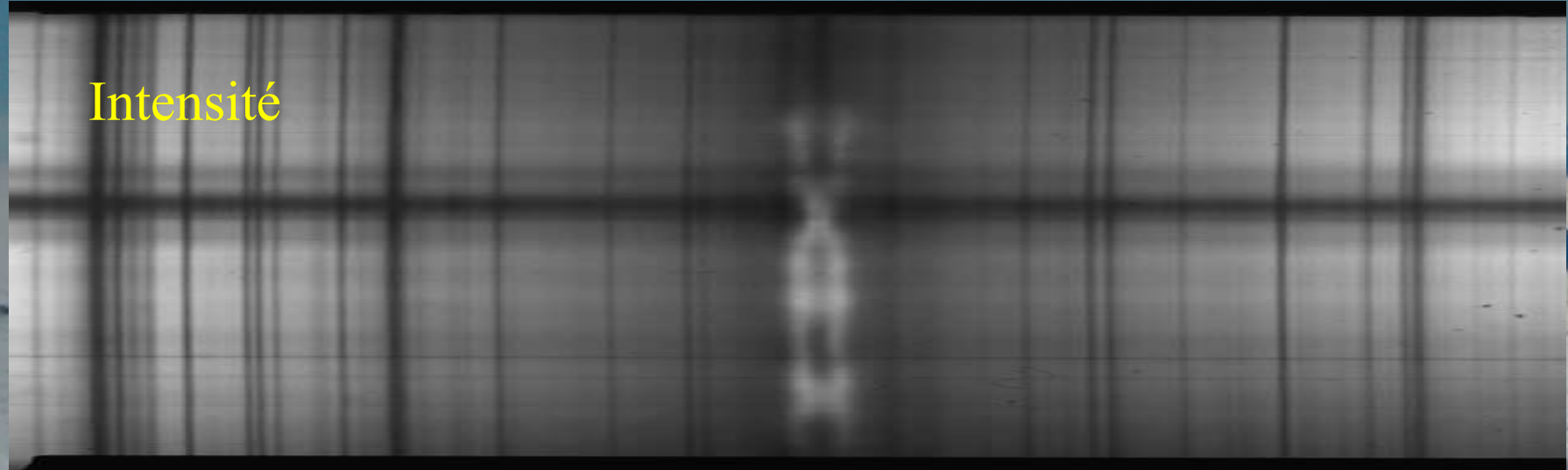
à 144 mA (basse chromosphère):
 $\langle B// \rangle = -420 \text{ G}$ $\langle V// \rangle = -590 \text{ m/s}$

à 288 mA (haute photosphère):
 $\langle B// \rangle = -630 \text{ G}$ $\langle V// \rangle = -950 \text{ m/s}$

Spectro polarimétrie dans le bleu

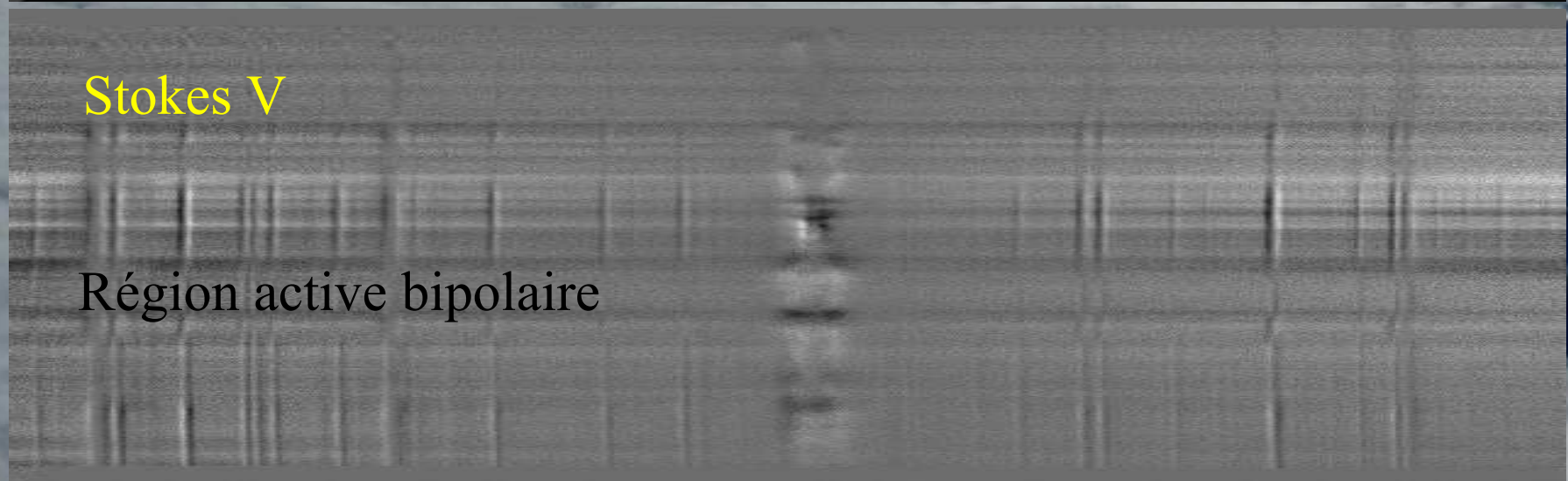
Exemple de la raie CaII K 3934 Å (2 spectres bruts soustraits)

Intensité



Stokes V

Région active bipolaire



Spectroscopie dans le bleu

ple de la bande CN 3874 Å, pose 1 s,
'', champ spectral 15 Å, pixel 10 mÅ

Spectro polarimétrie dans le bleu

Exemple de la bande CH 4305 Å (2 spectres bruts soustraits)

Intensité



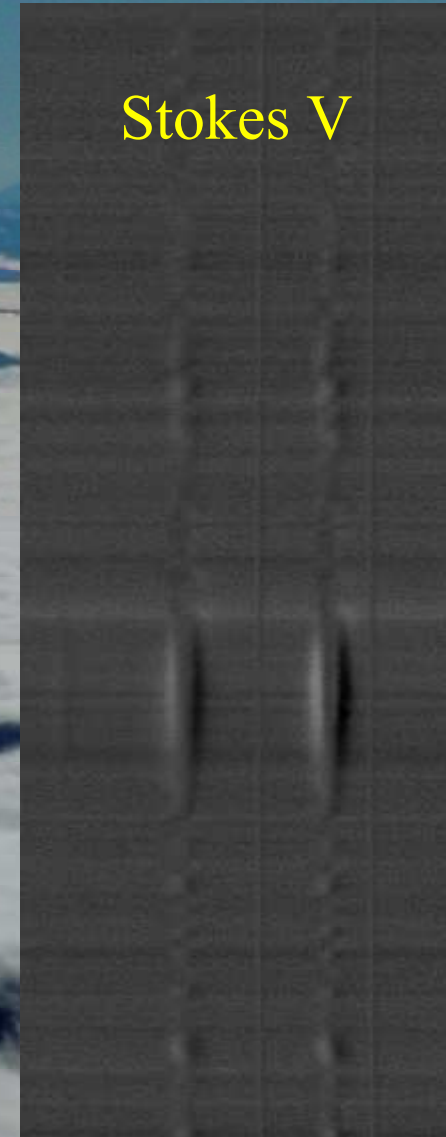
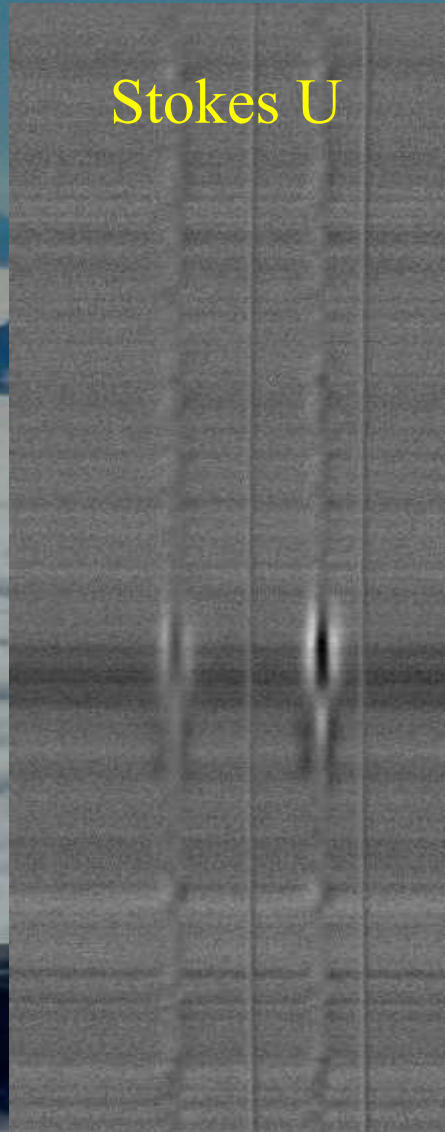
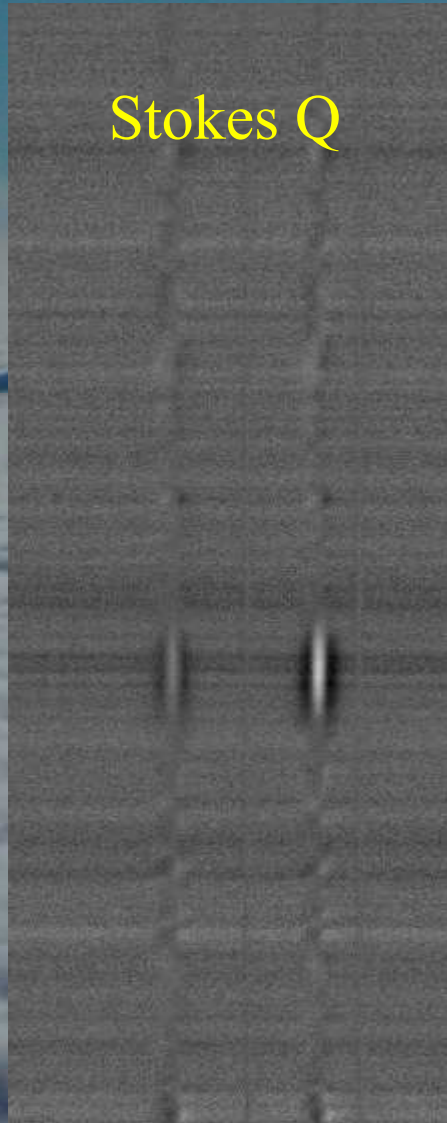
Stokes V



Région active bipolaire



Exemples de profils de Stokes en FeI 6301/6302 A (région active)
Profils bruts sans traitement (simple soustraction de 2 spectres)



Autre exemple, FeI 5250 Stokes Q, soustraction de 2 spectres bruts

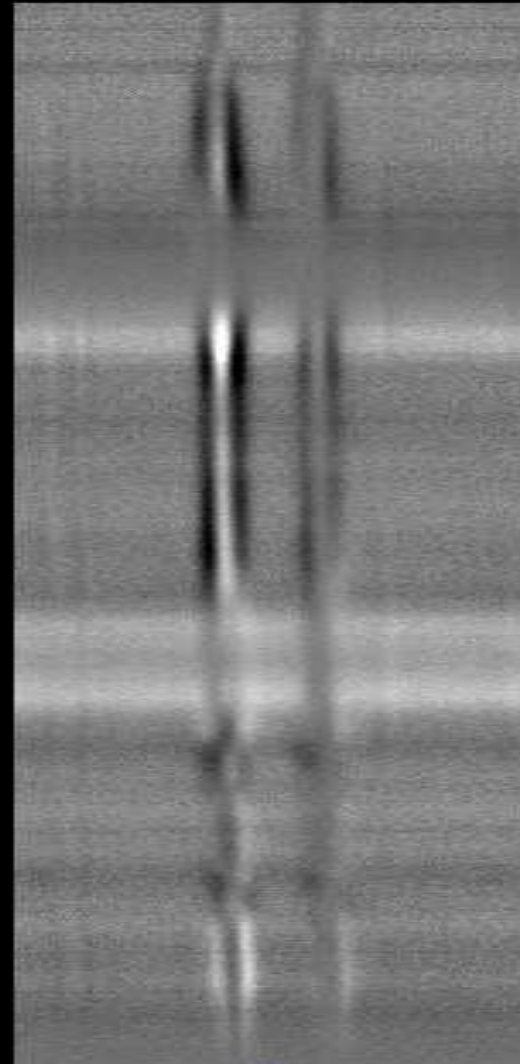
Sunspot group, 22 OCT 2003
Exp Time 50 ms, slit 0.6"



I+Q



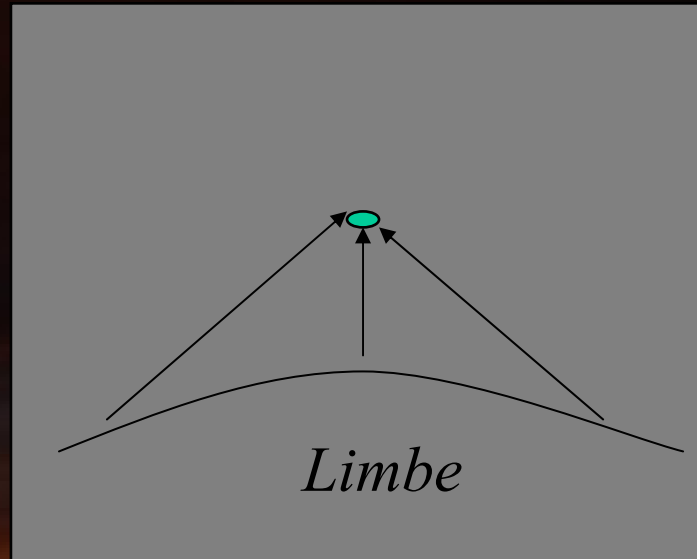
I-Q



Q

Second spectre: polarisation de résonance du spectre solaire au limbe

Rayonnement incident
anisotrope
(assombrissement centre bord)



On observe le rayonnement diffusé à 90°

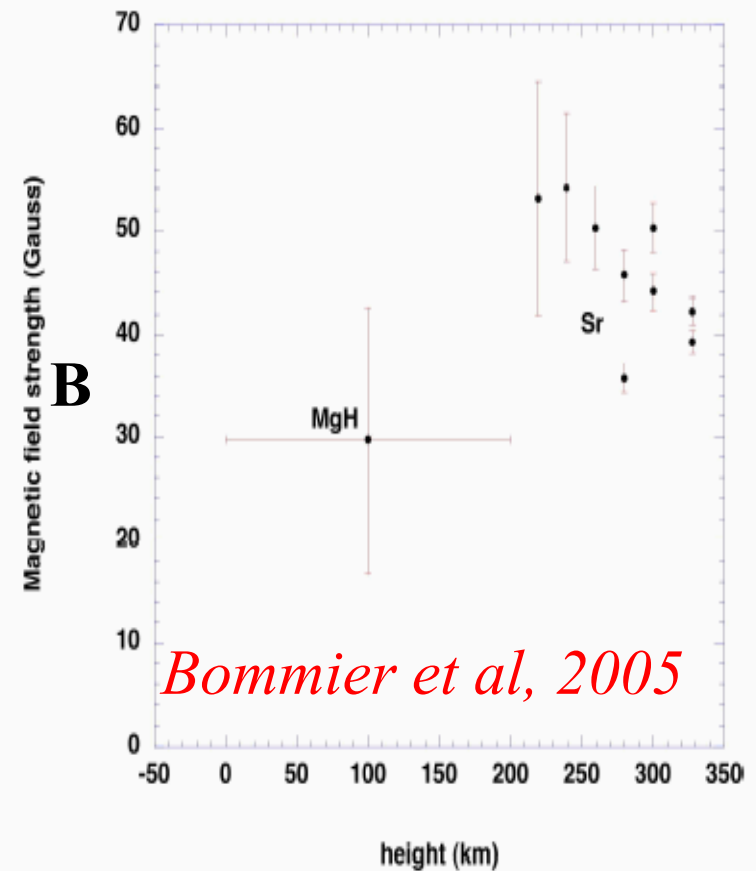
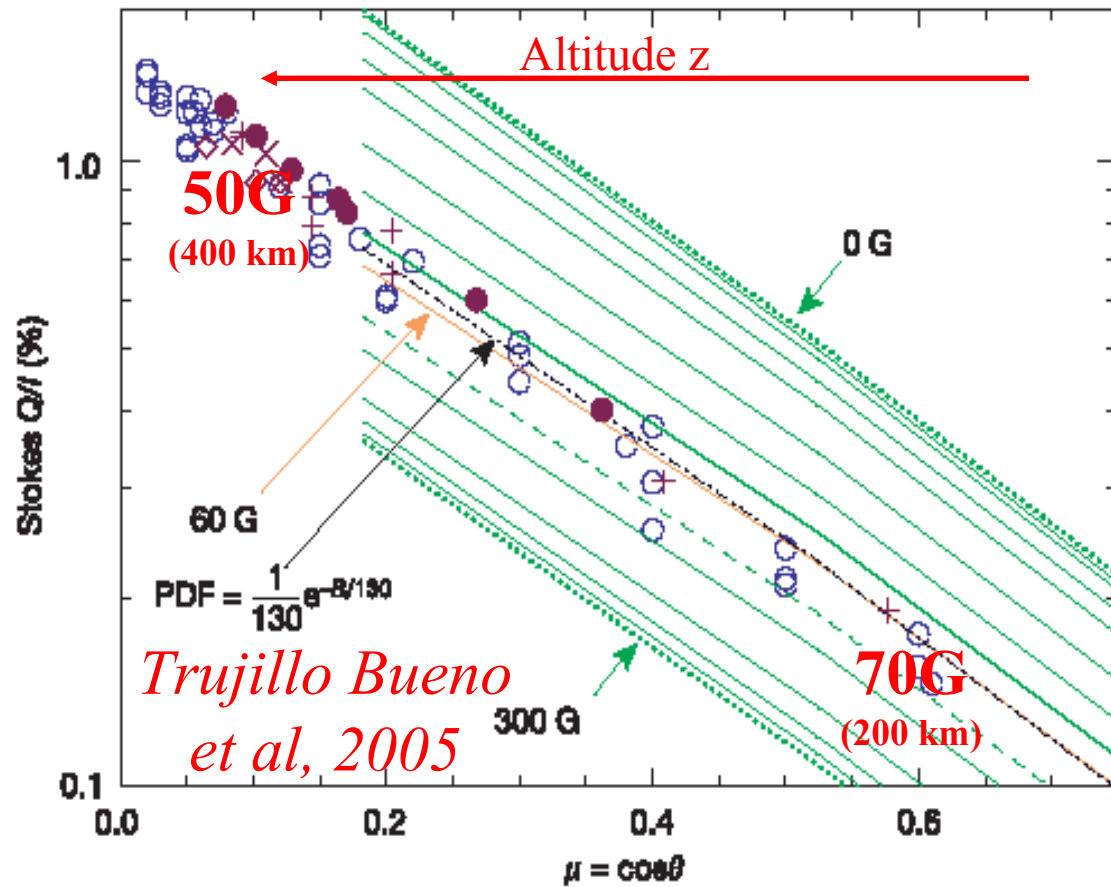
Effet Hanle

→ *Dépolarisation du rayonnement ré-émis résultant*

→ *Rotation du plan de polarisation*

Si $B=0$: polarisation linéaire parallèle au limbe (cf Rayleigh)

Si B faible non résolu: dépolarisation (photosphère) + rotation du plan de polarisation (chromosphère)

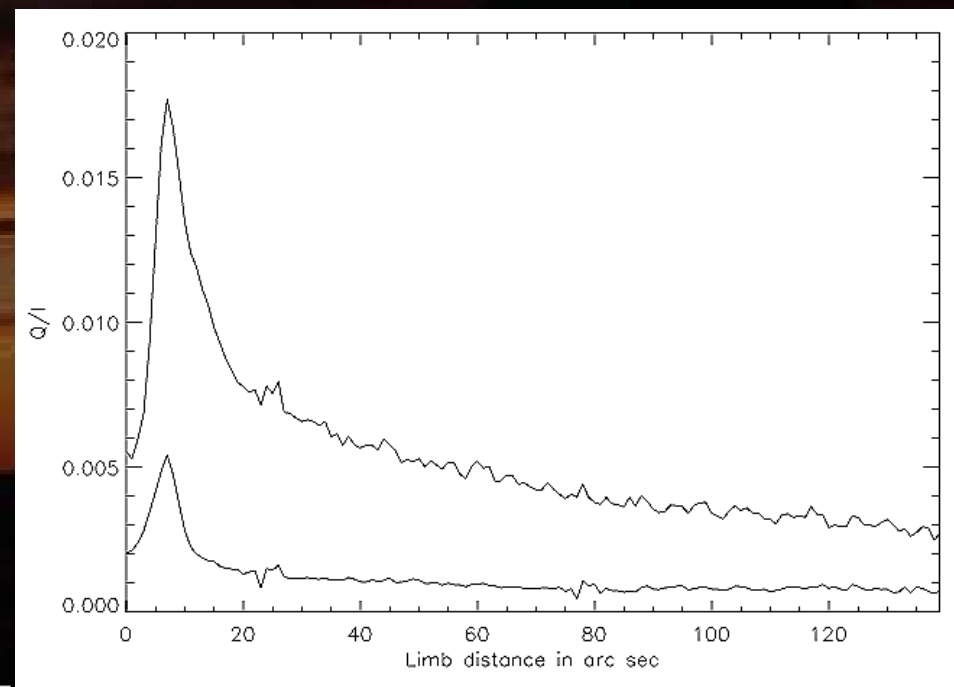
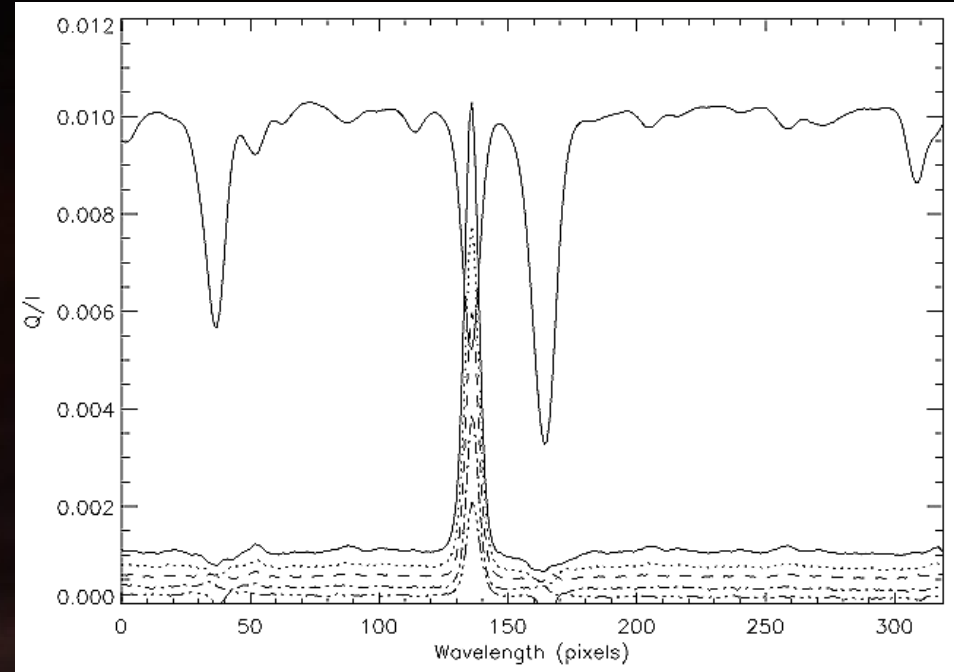
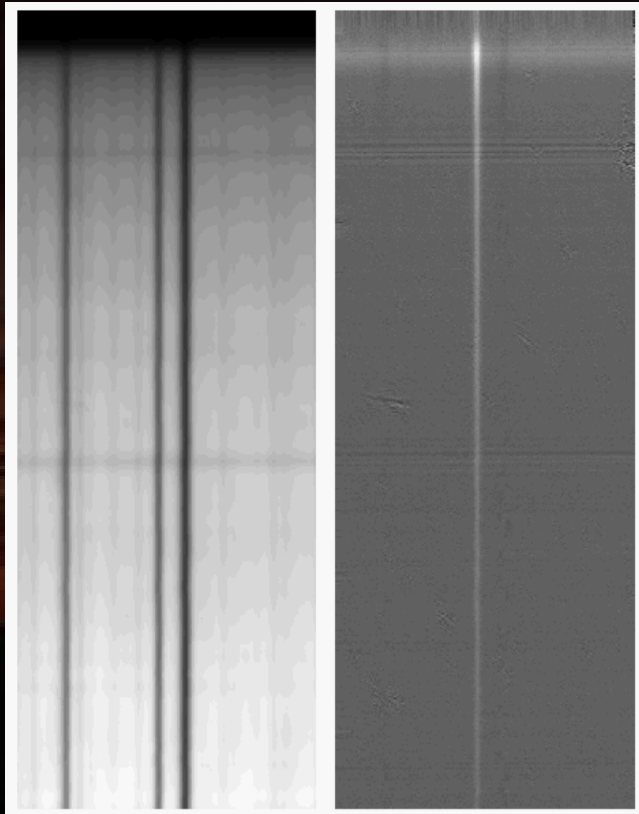


Coloured lines, 3D scattering polarization calculations in the presence of a single-valued microturbulent field with an isotropic distribution of directions (from top to bottom: 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 150, 200, 250 and 300 G). The best average fit to SrI 4607 observations is obtained for 60 G (Trujillo Bueno et al, *Nature*, 2004)

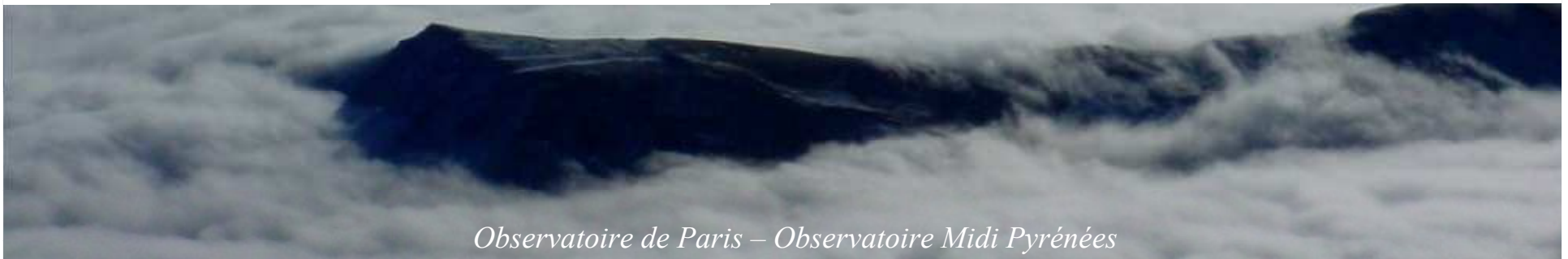
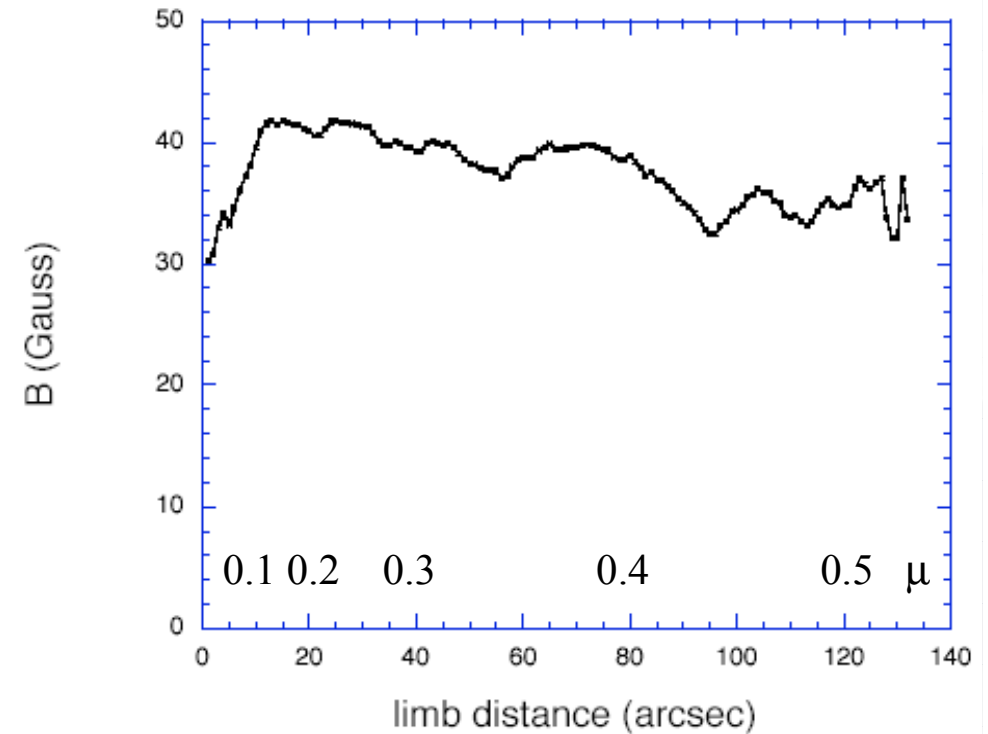
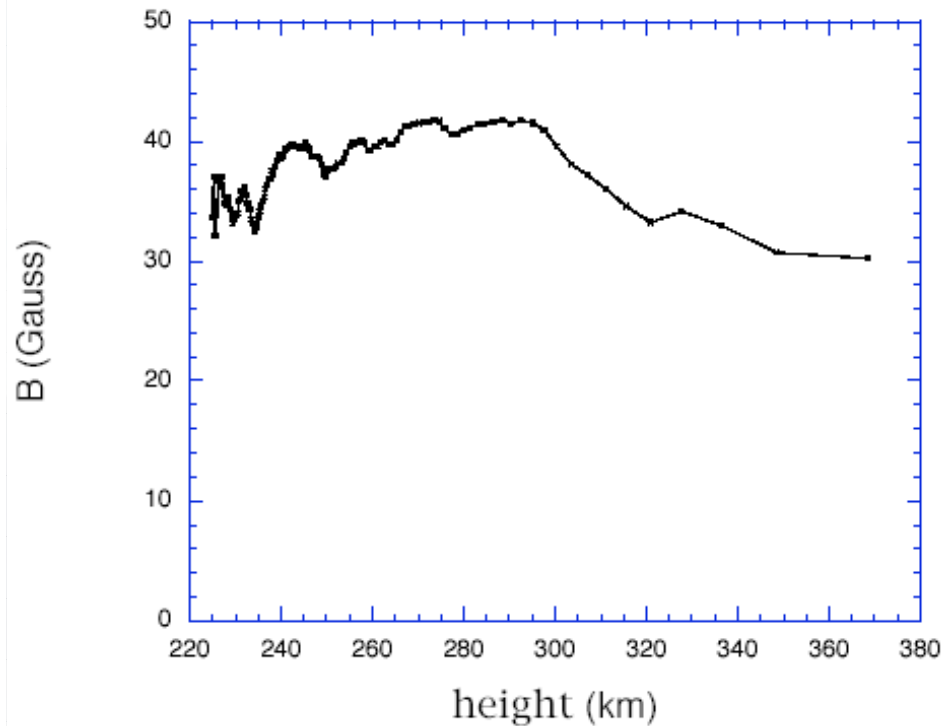
Second spectre dans le bleu

SrI 4607 Å, Stokes Q, 2004

→ B et (dB/dz) turbulent dans la photosphère



Variation du champ magnétique *moyen* avec l'altitude (modélisation M. Derouich, V. Bommier, à partir des Observations 2004 du Pic du Midi)





Variations spatiales de la polarisation dans les raies près du limbe

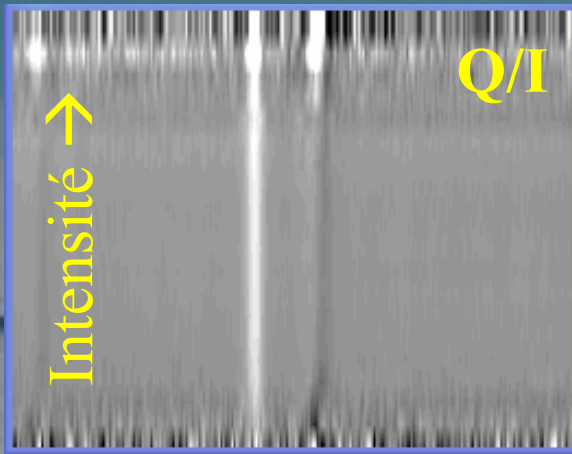
Prédiction théorique:

$\|B\|$ plus fort dans les intergranules que dans les granules

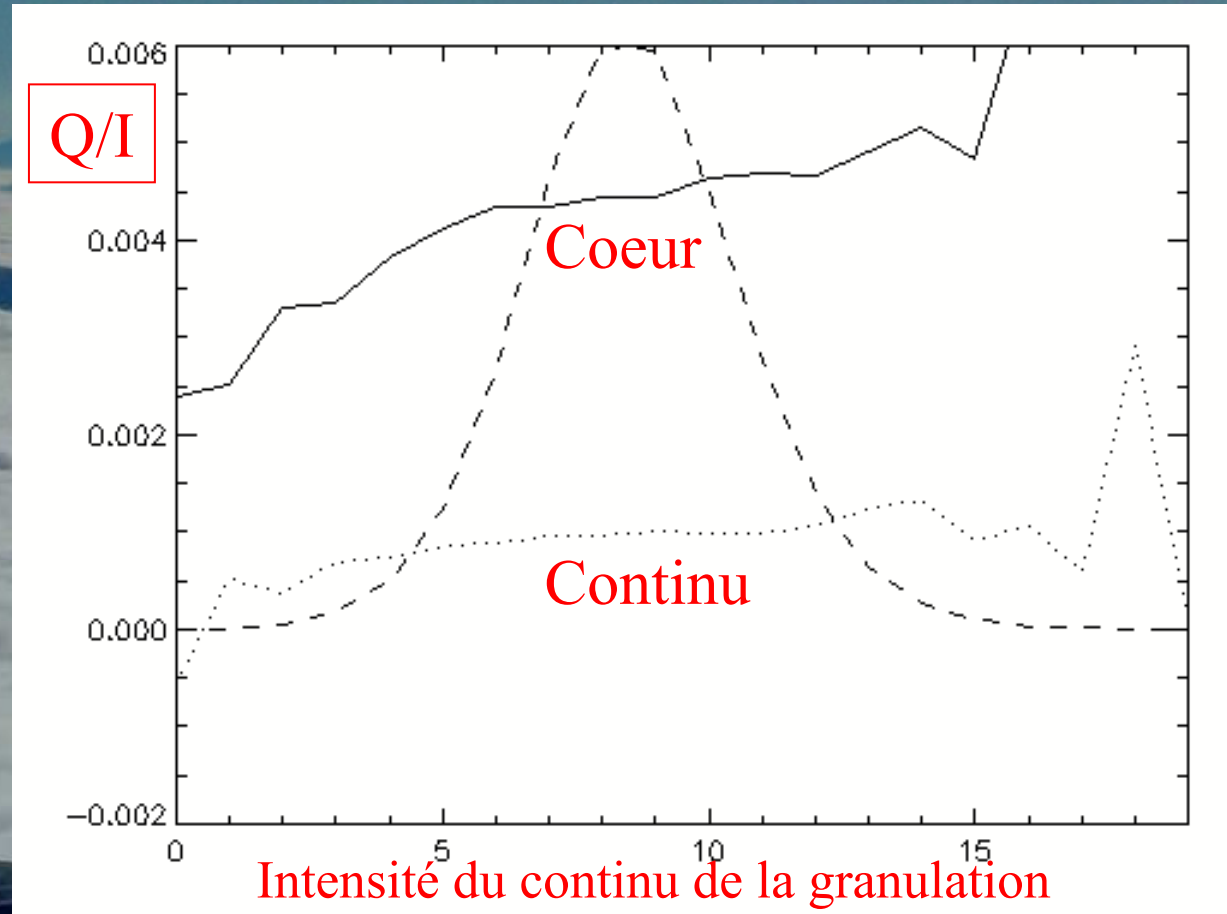
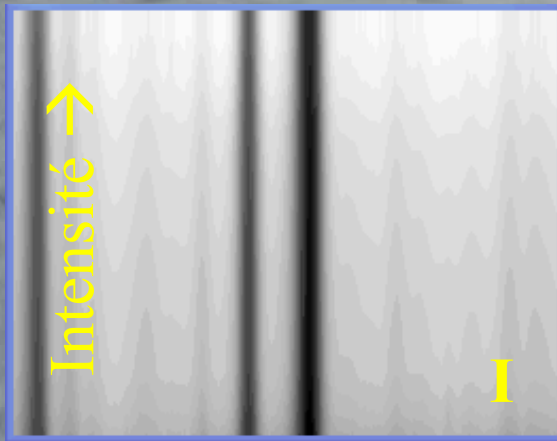
→ Mesurer Q/I dans le réseau convectif photosphérique et chromosphérique

(difficile: haute résolution nécessaire, anamorphose et faible contraste au bord)

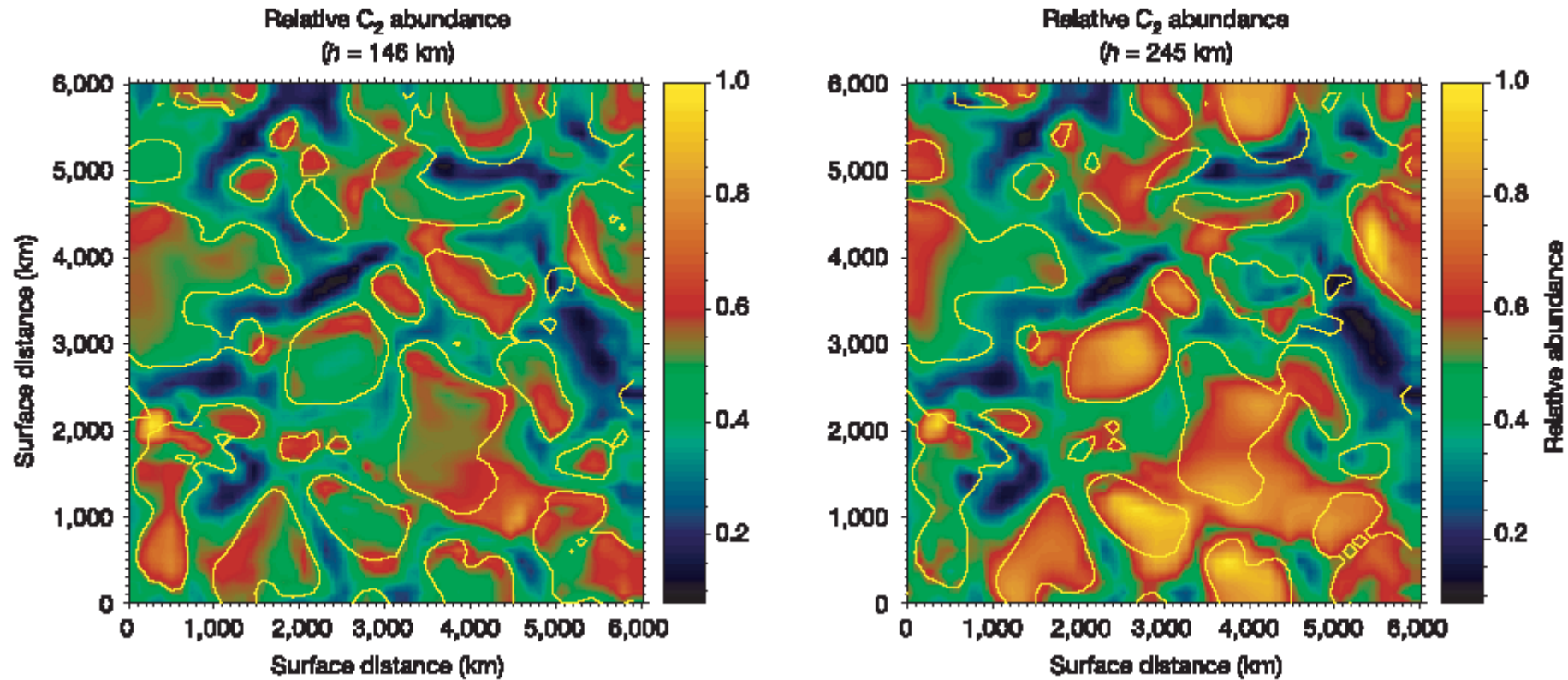
Variation du champ magnétique turbulent avec les structures solaires (observations 2004), SrI 4607, fente 0.6''



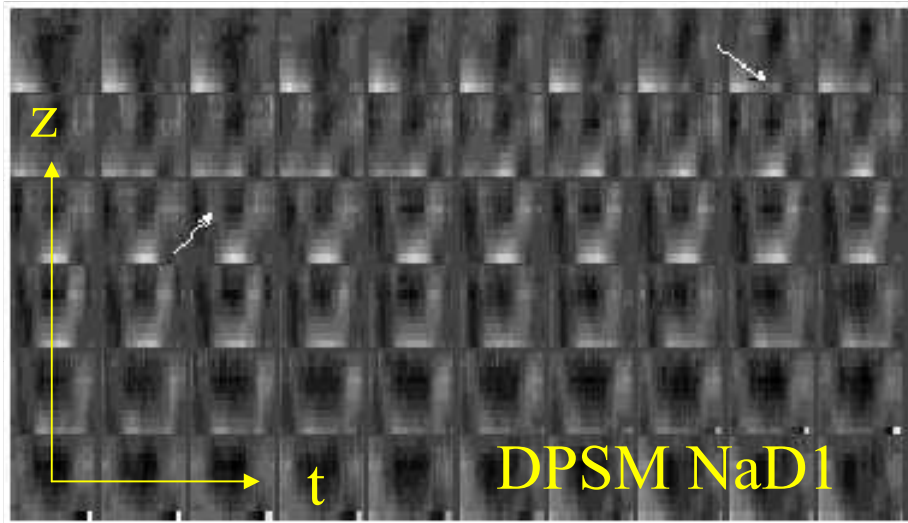
λ →



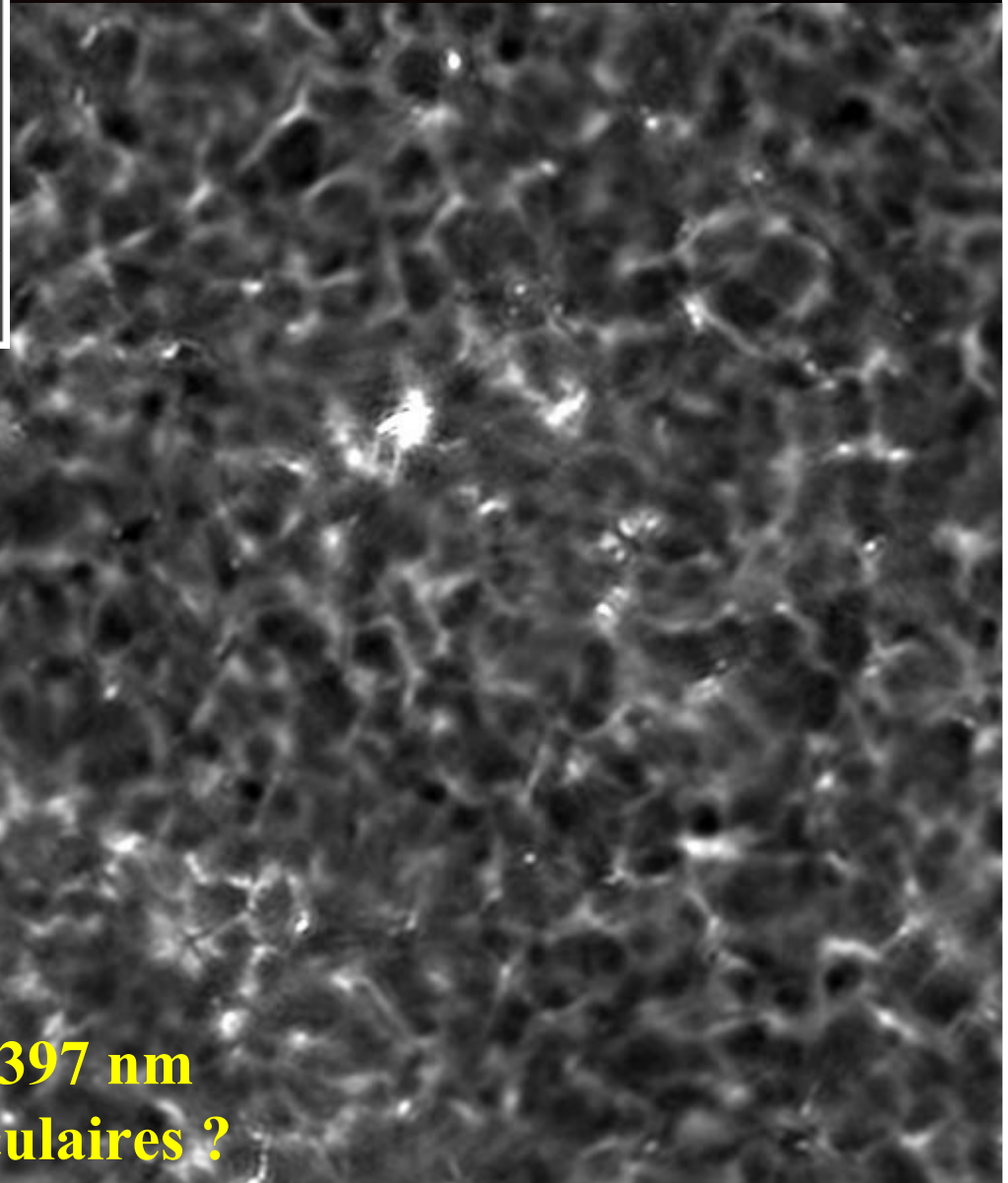
||B|| plus fort dans les espaces intergranulaires ?



Most of the volume of the upflowing granules where the observed C₂ line polarization originates is occupied by magnetic fields much weaker (10 G) than what is needed (60 G) to explain the observed depolarization in the Sr I 4607 Å line. Therefore, most (but not all) of the observed Sr I line depolarization must be produced by relatively strong and tangled fields in the intergranular regions (Trujillo Bueno, *Nature*, 2004)



Inversion des contrastes granule/intergranule



DOT bande G 430 nm / Ca H 397 nm
Qu'en est il avec les raies moléculaires ?

Variations spatiales de la polarisation

Actions à entreprendre à la lumière des prédictions théoriques:

Sur SrI (4607):

recueillir des spectres à haute résolution spatiale (0.3'')
en polarimétrie au limbe (40'' ou 80'' du bord)

→ ||B|| intergranules et granules

Examiner la contrepartie chromosphérique (BaII 4554)

Sur C2 (5139-5142):

recueillir des spectres en intensité au centre disque (y a t-il une variation d'abondance de C2 granules/intergranules ?)

Si oui, recueillir des données en polarisation au limbe,

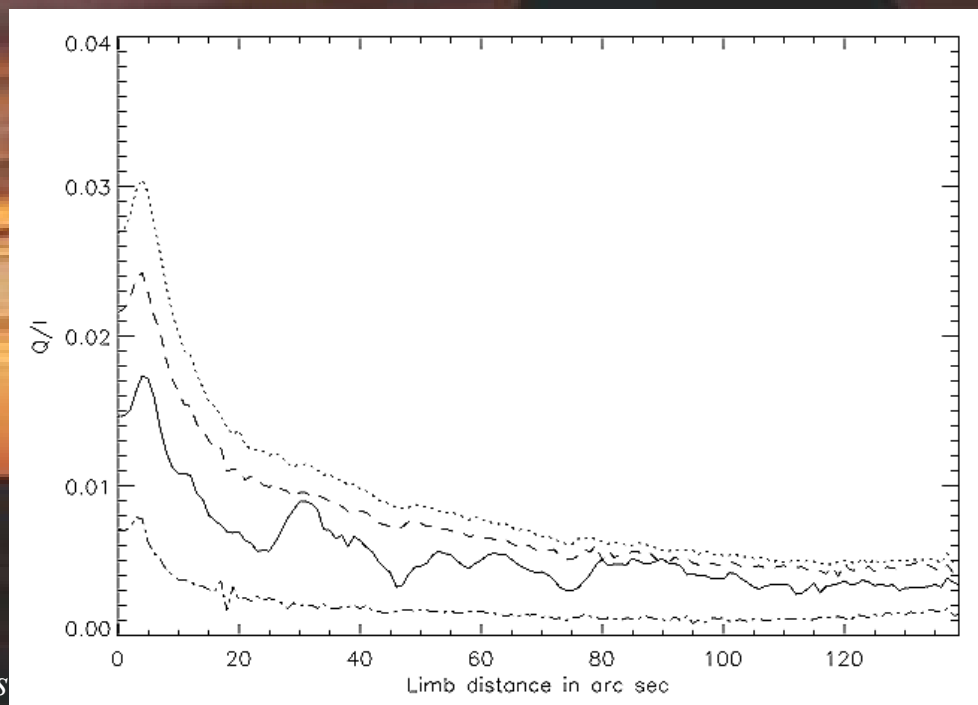
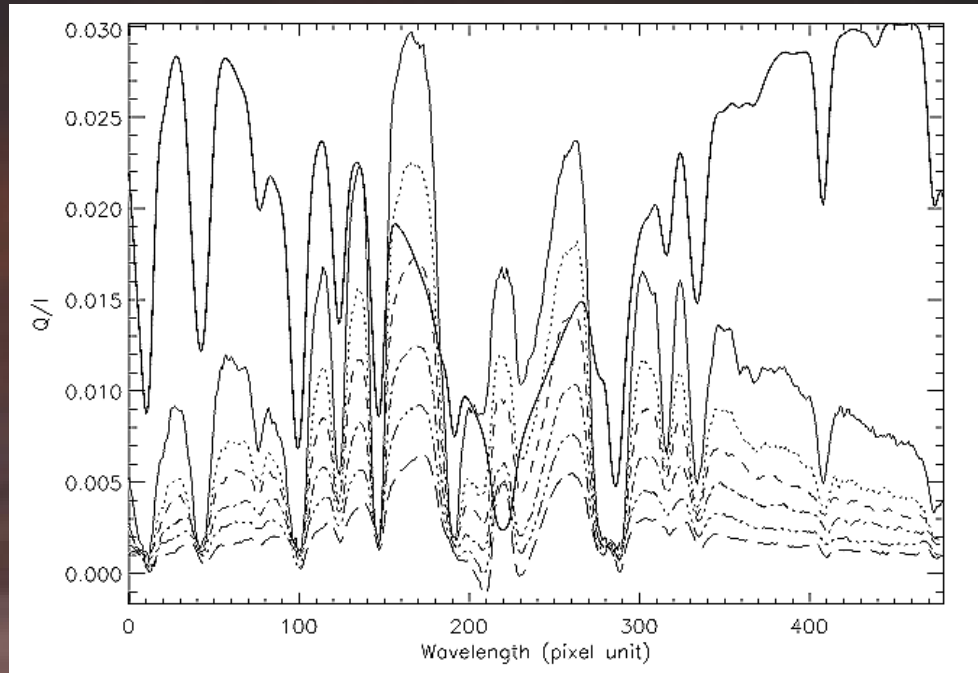
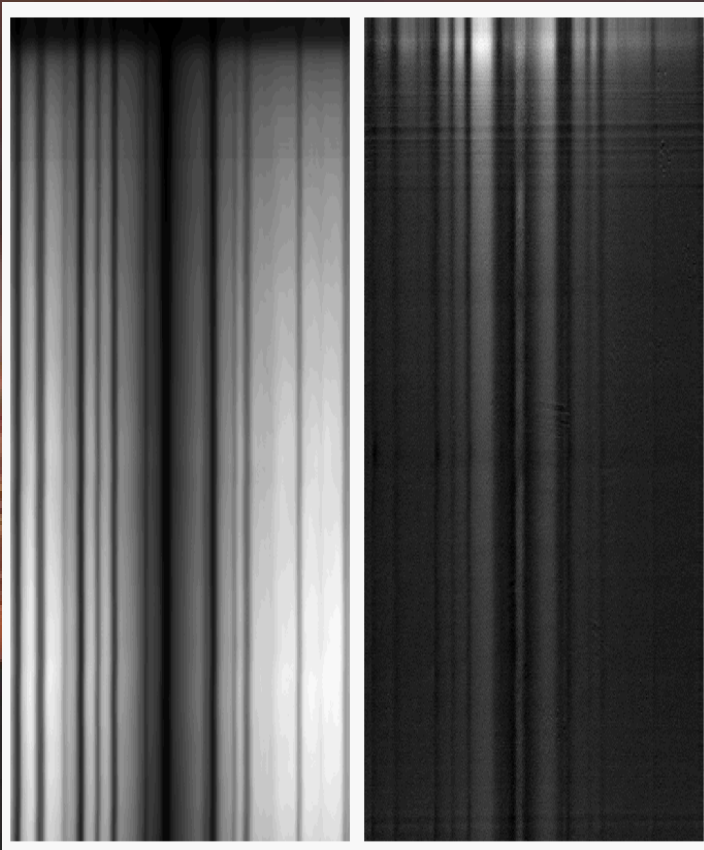
→ ||B|| granules

Comparer avec les résultats SrI (si C2 donne ||B|| granulaire, il est peut être possible de déduire ||B|| intergranulaire de SrI même en résolution spatiale modérée)

Second spectre dans le bleu

CaI 4227 Å, Stokes Q, 2004

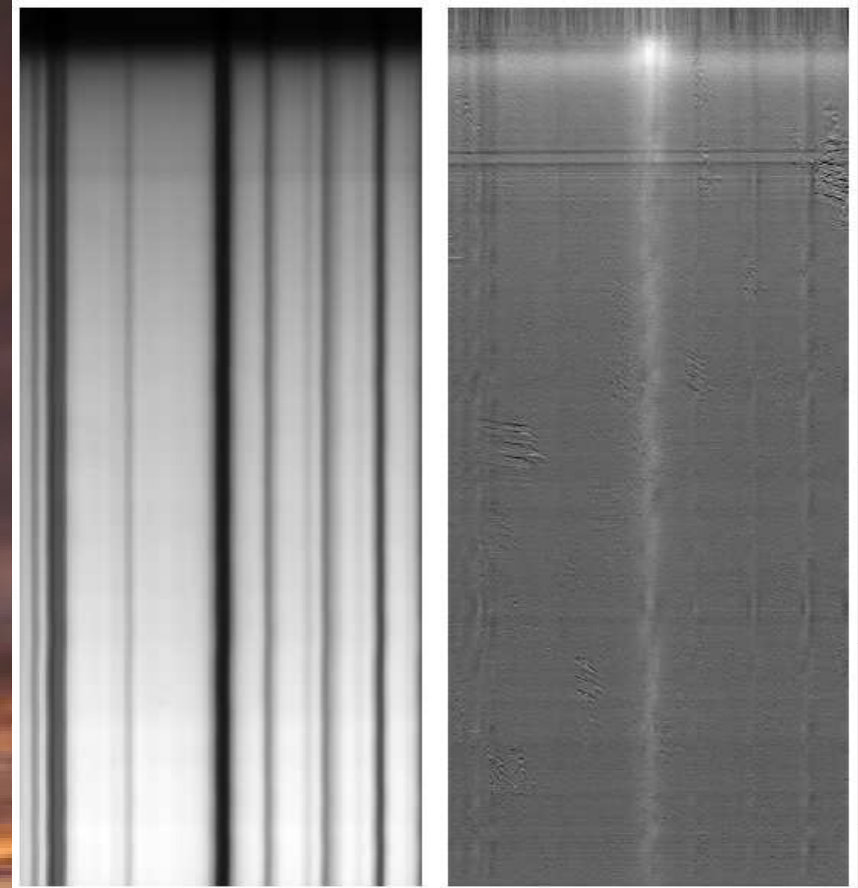
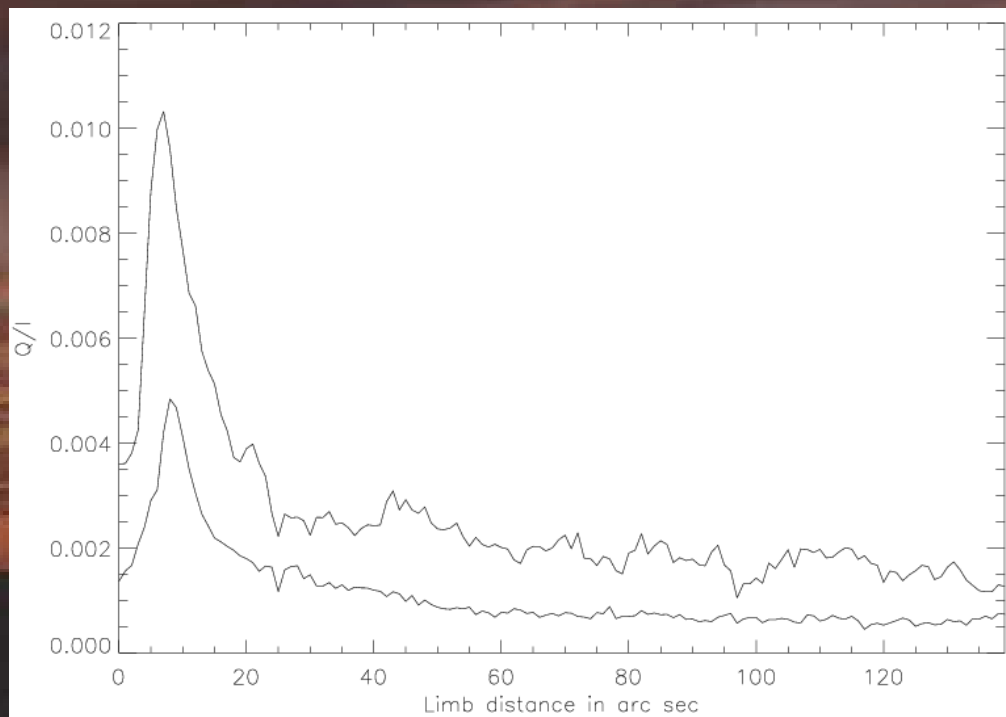
→ B et (dB/dz) turbulent dans la chromosphère



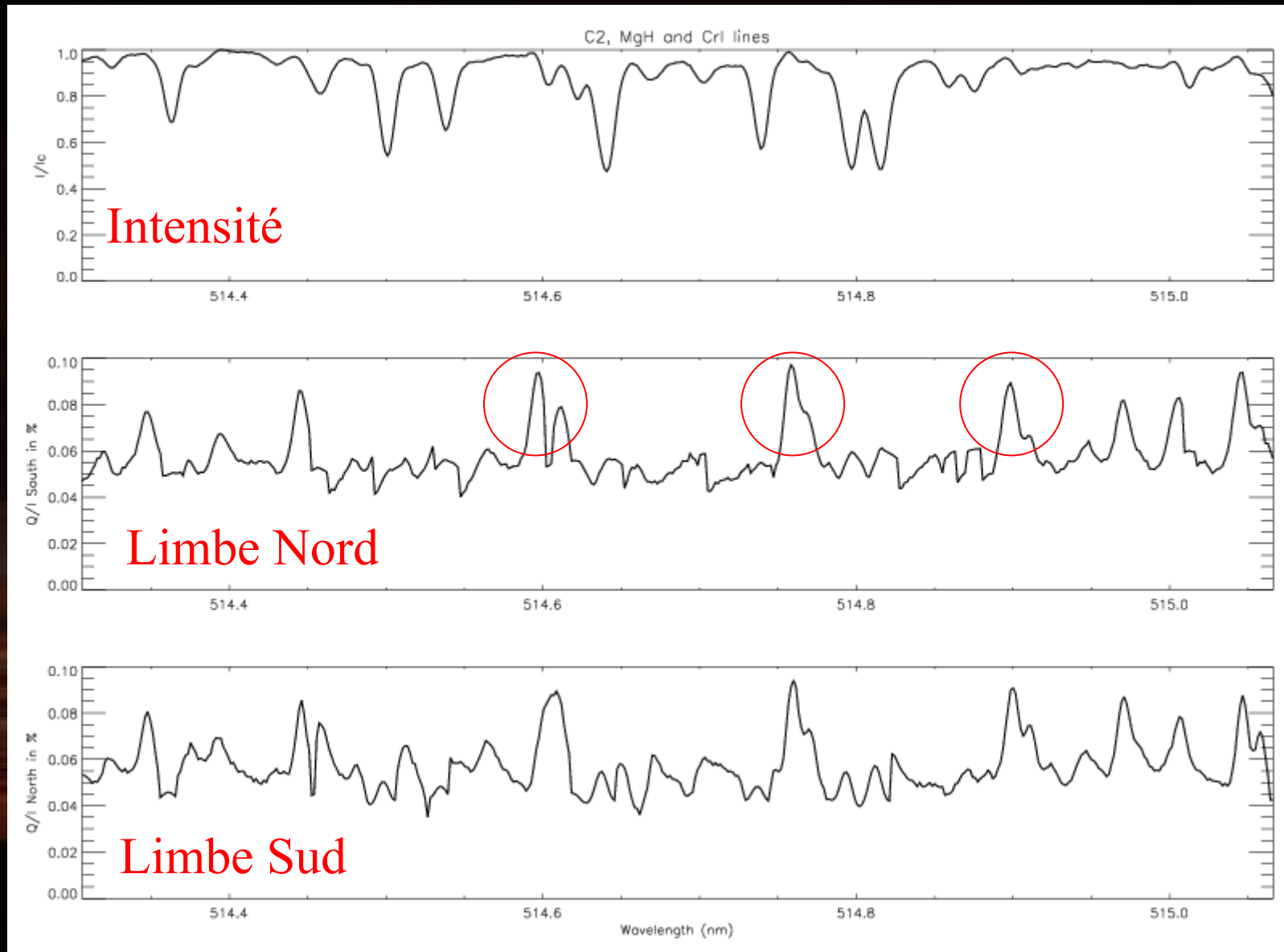
Second spectre dans le bleu

BaII 4554 A, Stokes Q, 2004

→ B et (dB/dz) turbulent dans la chromosphère

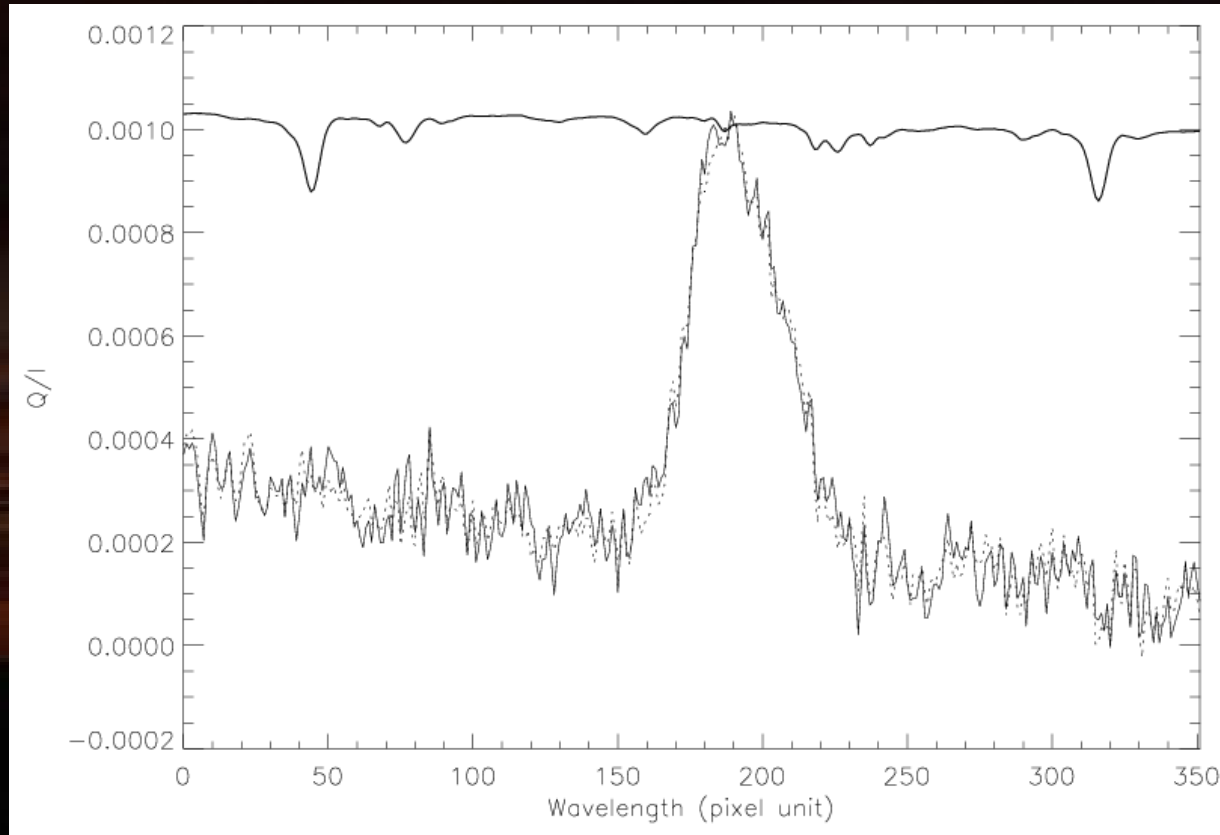
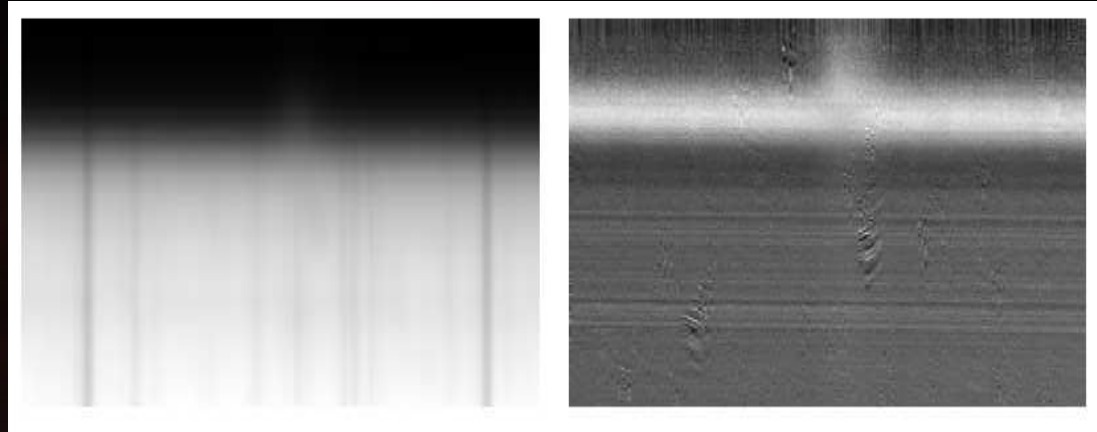


Effet Hanle différentiel sur les raies moléculaires de C2



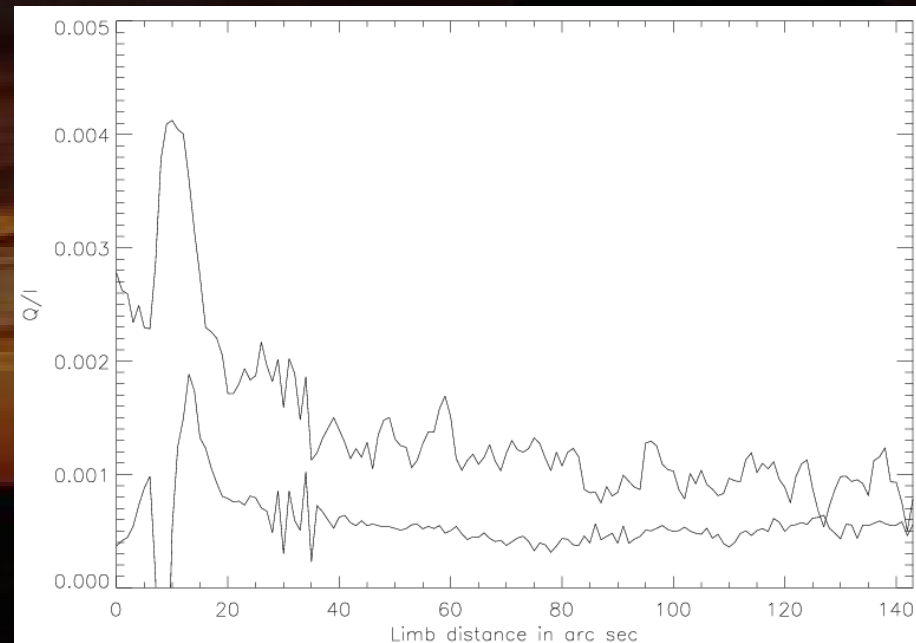
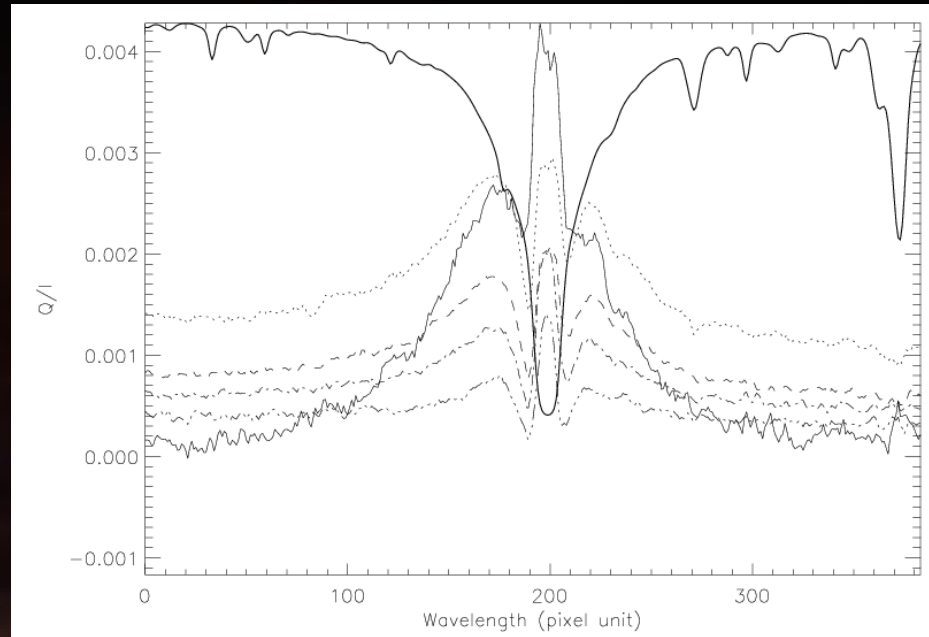
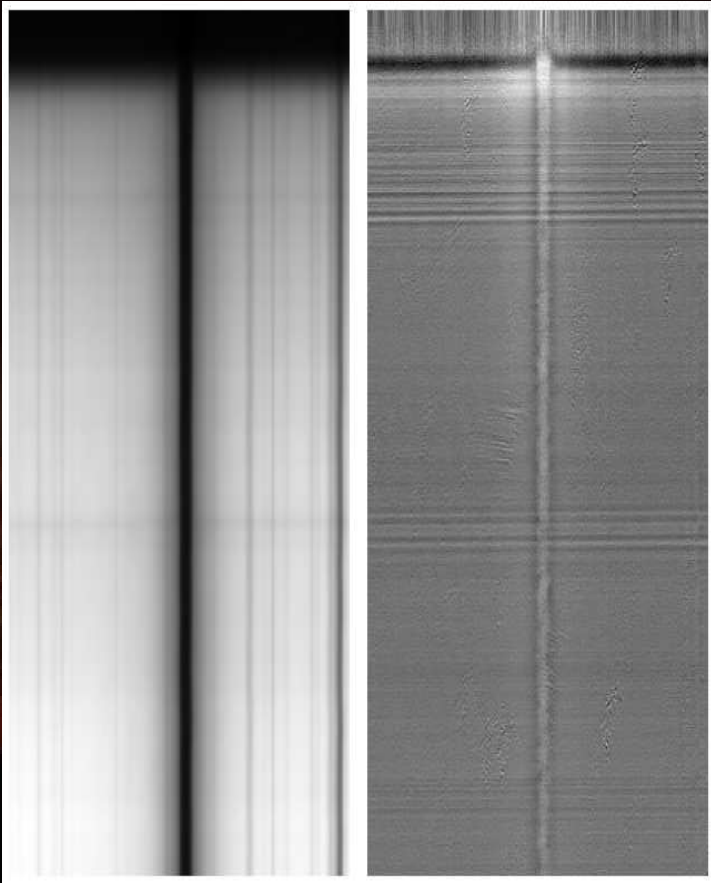
Polarisations faibles

du second spectre,
HeD3 5876 Å,
Stokes Q, 2004

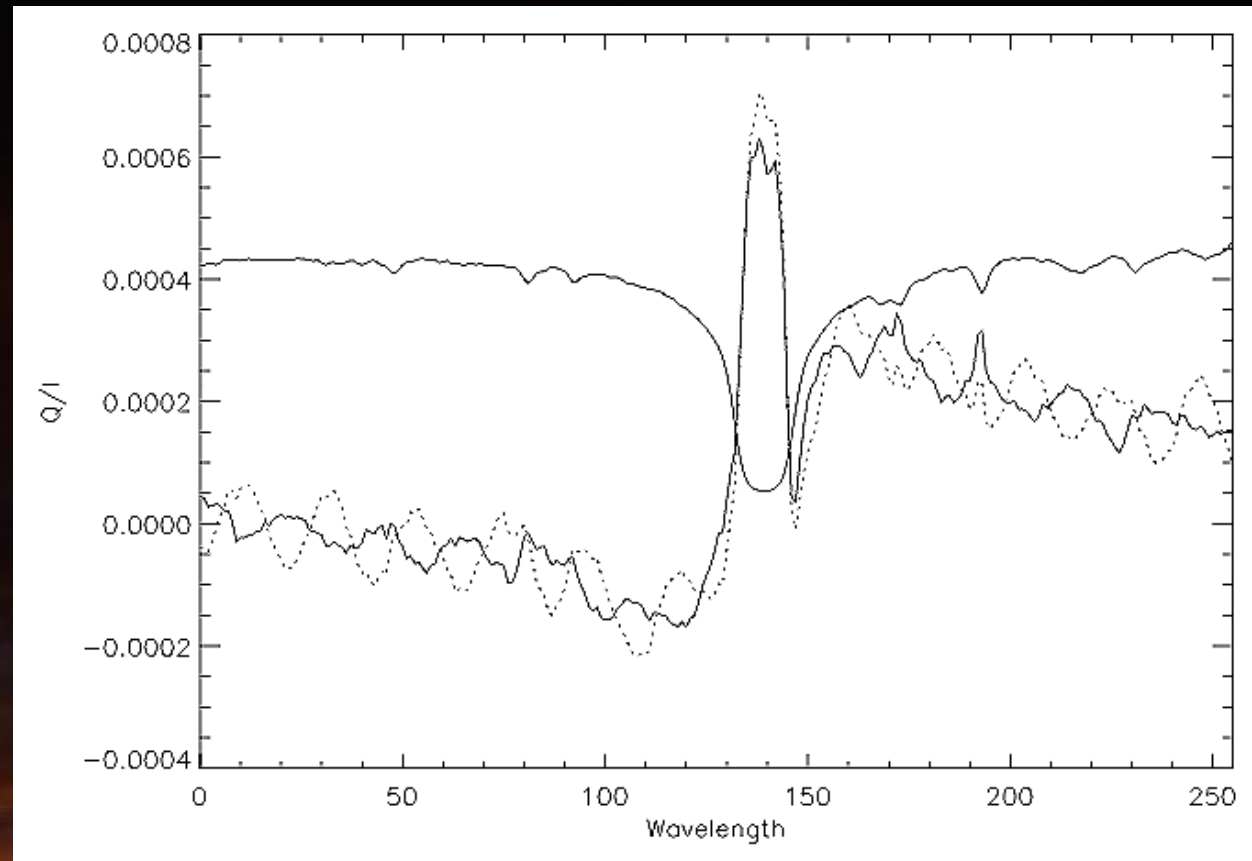
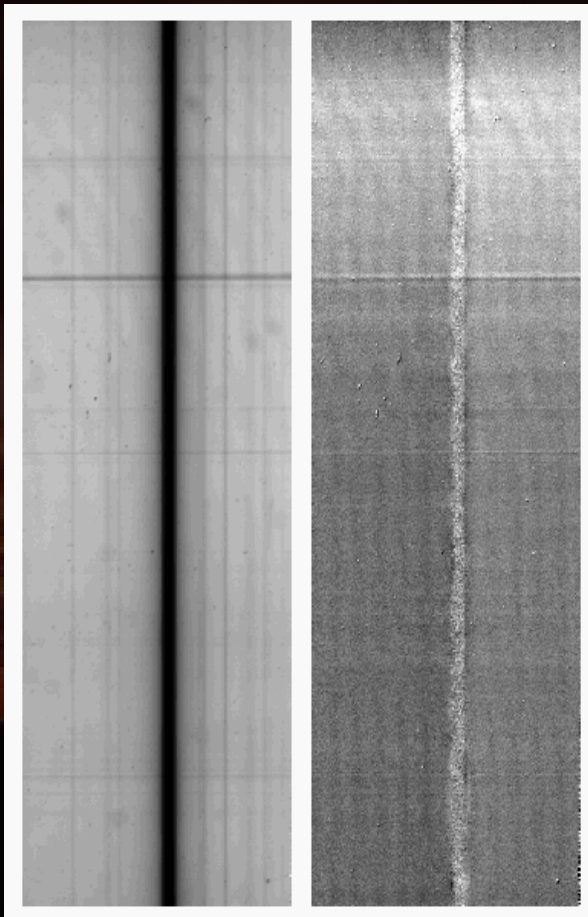


D3 au limbe
dans la
chromosphère

Polarisations faibles
du second spectre,
Na D2 5890 Å,
Stokes Q, 2004

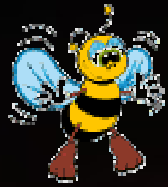


Polarisations faibles
du second spectre,
Na D1 5896 Å,
Stokes Q, 2004



- Mesure des anomalies de polarisation
- Processus de polarisation des raies

Sensibilité requise 10⁻⁵



Combien ça coûte en fonctionnement ?



Année PNST	LESIA	LA2T	Total	
2002	7500	4000	1700	13200
2003	10000	6000	3000	19000 *
2004	8000	8000	5500	21500 *
2005	5000	5000 ?	5000 ?	15000

- Budget de fonctionnement annuel de **15000 Euros hors salaires seulement, y compris les frais de mission**
- Coût de la publication vraiment très compétitif
- L'aide des laboratoires est importante, mais ne pourrait être obtenue sans un soutien et un avis favorable du PNST qui reste absolument essentiel

(*) Années de budgétisation des polarimètres FLC et NLC

Le personnel

Pas de personnel technique affecté à la LJR, donc:

- Pas d'opérateur → instrument réservé à un cercle d'initiés
- Les astronomes contribuent aux réglages et aux travaux techniques de développement (on aimerait à ce titre un classement en service d'observation au SO6 de l'INSU)
- L'assistance d'un ingénieur opticien du LESIA
- Appel très fréquent à des stagiaires d'écoles d'ingénieur (ENIT à Tarbes) en électronique notamment

L'aide des laboratoires utilisateurs est ponctuelle mais essentielle

- Petite mécanique au LA2T et au LESIA
- Bureau d'études du LA2T (grands axes)
- Aide des équipes techniques en roulement au Pic du Midi

Conclusion: les domaines concurrentiels

Spectro-polarimétrie des raies bleues 390-460 nm au limbe

Spectro-polarimétrie à haute résolution spatiale

SrI 4607, BaII 4554, CH 4307, CaI 4227, SrII 4078...

Spectro-imagerie polarimétrique à haute résolution angulaire

type DPSM sur le disque (0.3'', par rafales)

NaD1 5896, CaI 6103

Jusqu'en 2004: beaucoup de travaux techniques, de calibrations et de tests exploratoires (*absence de personnel technique affecté*)

Il y en aura encore en 2005 (séparateur de faisceaux, tests en imagerie polarimétrique, boîte DPSM raies fines)

→ La phase d'exploitation scientifique commence