

Rencontres du Ciel et de l'Espace  
du 9 au 11 Novembre 2024  
Cité des Sciences et de l'Industrie

Spectroscopie à l'éclipse totale de Soleil du 12 Août 2026

Cyrille Bazin

<https://theses.hal.science/tel-00921889v2>

[https://theses.hal.science/file/index/docid/921889/filename/BazinCyrille\\_PhD.pdf](https://theses.hal.science/file/index/docid/921889/filename/BazinCyrille_PhD.pdf)

[https://pnst.ias.u-psud.fr/colloque\\_2014/presentations/Session\\_1\\_poster\\_1\\_1\\_Bazin.pdf](https://pnst.ias.u-psud.fr/colloque_2014/presentations/Session_1_poster_1_1_Bazin.pdf)

<https://lesia.obspm.fr/RencontresSolaires2005/presentations/SpectroscopieAmateur.pdf>

<http://www.astrosurf.com/jiaifer/pagemissionspectro.htm>

# Intérêt de la spectroscopie aux éclipses totales de Soleil

Pas de lumière parasite provenant du bord du disque: le phénomène a lieu dans l'espace

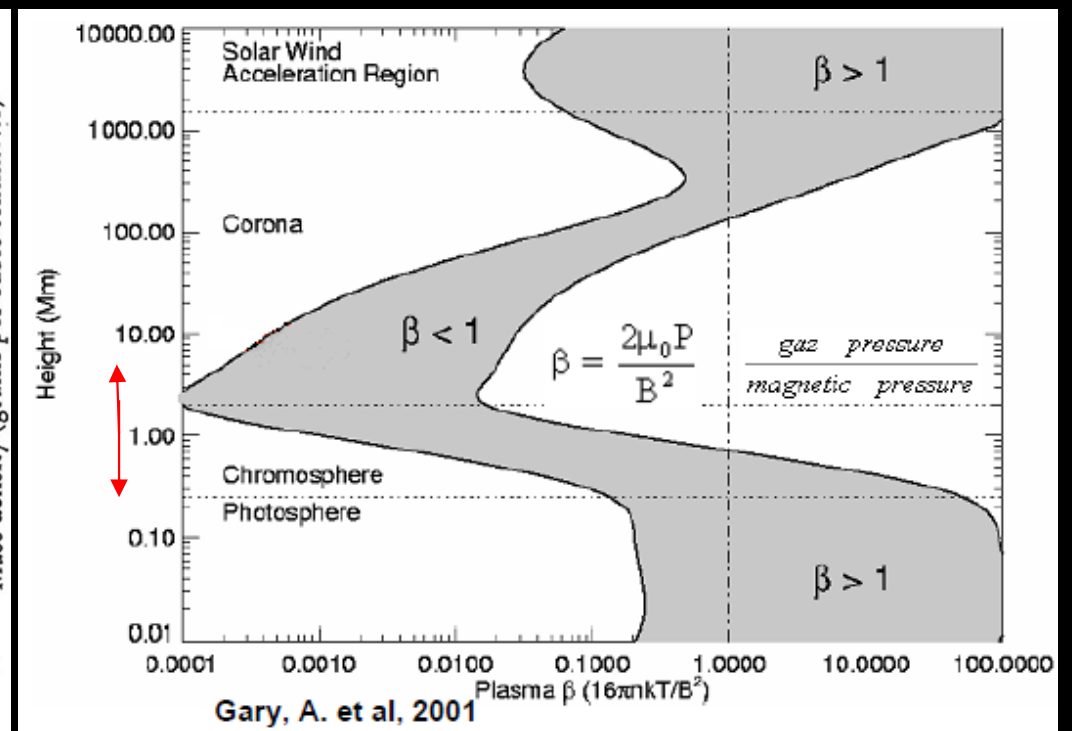
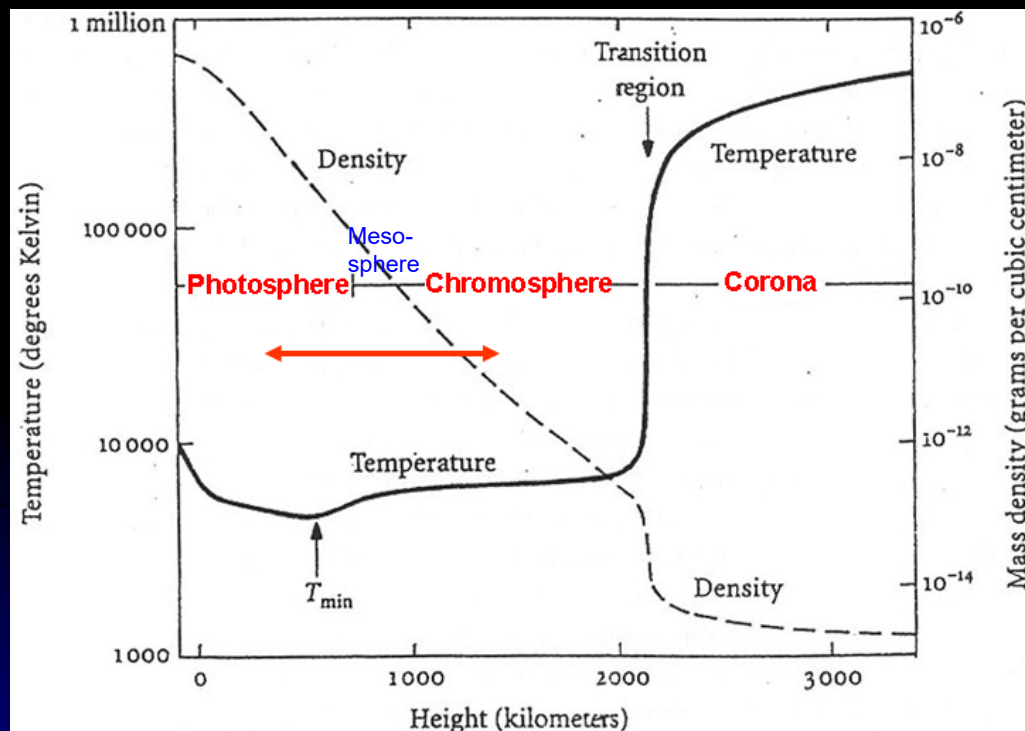
Définir le « bord » solaire en conditions d'éclipse en tenant compte du relief lunaire

Séparer le continu, et les raies des éléments dans la basse atmosphère solaire



# Structuration du bord solaire :

Interfaces photosphère-chromosphère/couronne solaire  
Définir le bord solaire en condition d'éclipses totales



Vernazza, Avrett, Loeser 1976 (modèle VAL)

## Contexte :

- Etude de la remontée en température dans l'atmosphère solaire
- Etude des éléments « Low First Ionisation Potential »
- Composition, structure des très basses couches de l'atmosphère solaire
- Etude des raies d'éléments chimiques présents comme traceurs
- Analyse des éléments neutres et une fois ionisés très proches du limbe solaire
- Basses couches : abondances et densités plus élevées
- Sondage des derniers 100 km au-dessus du limbe photosphérique
- Accès à ces enveloppes de plasma : mécanismes d'excitation, ionisation
- Domaine visible au sol : complément aux expériences UV – EUV - X spatiales
- Raies spectrales optiquement minces

## Méthode :

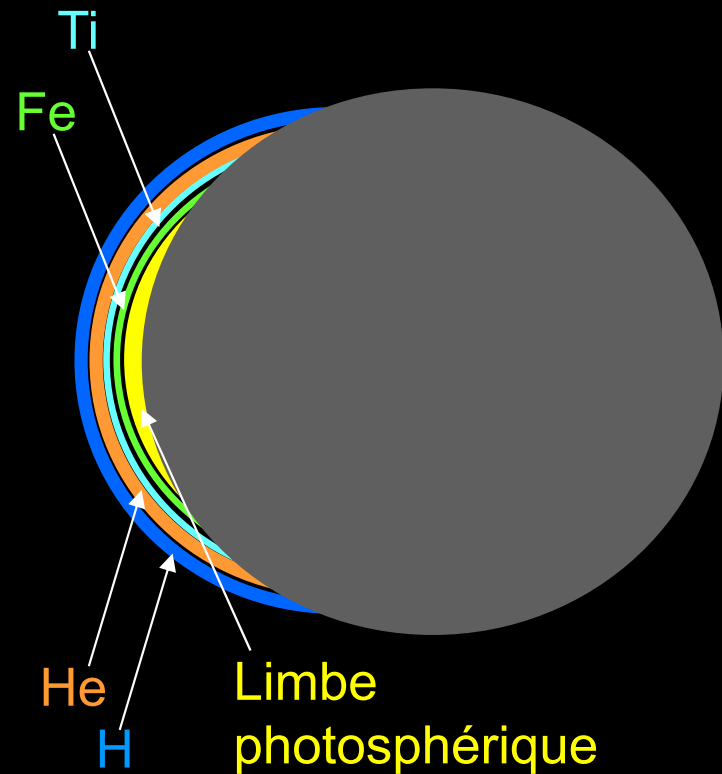
- Utilisation de la spectroscopie sans fente : mouvement bord lunaire fente naturelle
- Défilement spatio-temporel du bord de la Lune pour sonder les enveloppes
- Spectroscopie éclair lors des 2 contacts avant et après la totalité d'éclipse

## Moyens :

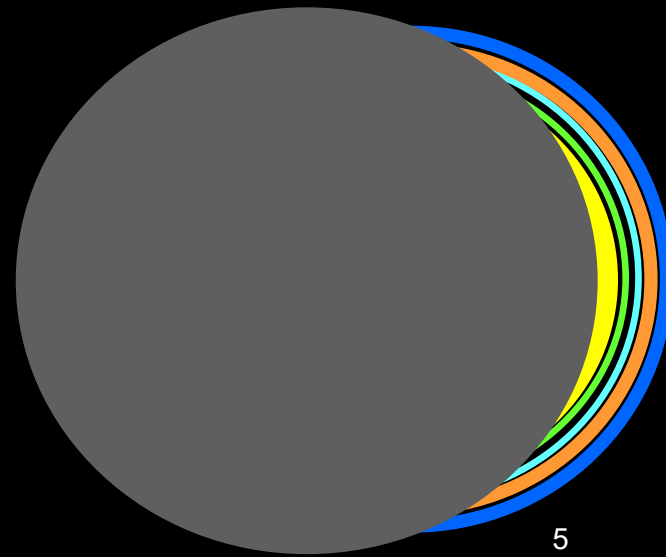
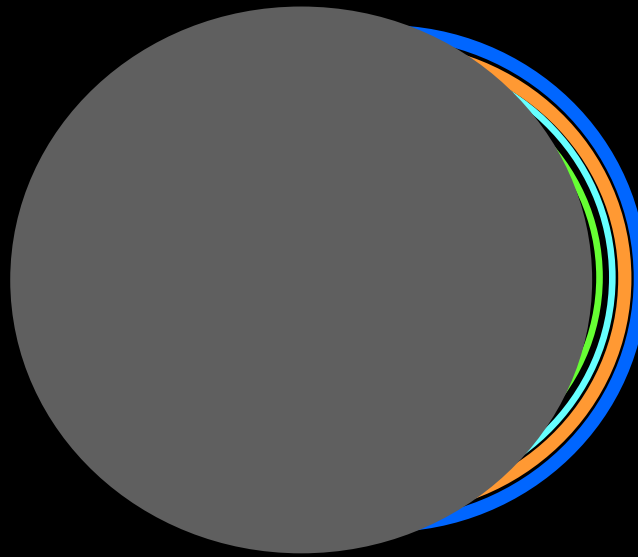
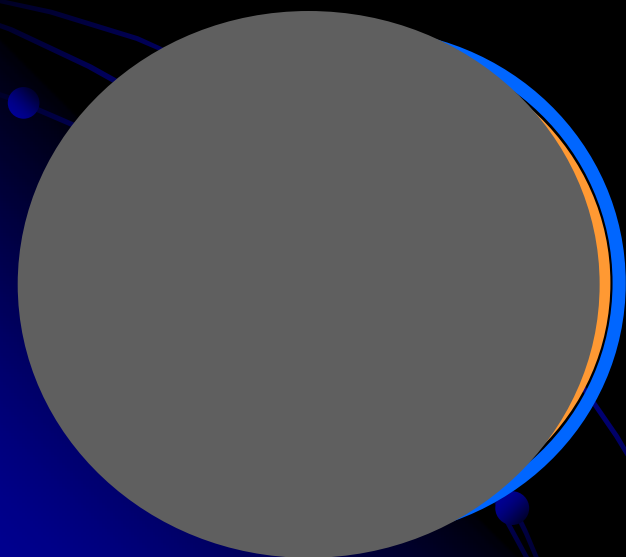
- Technique du réseau objectif : réseau de diffraction par transmission placé devant un objectif (lunette achromatique)
- Imagerie CCD rapide : 15 images/seconde en enregistrement continu

# Schéma des couches de plasma du bord solaire : sondage spectre éclair

2<sup>nd</sup> contact (début totalité)

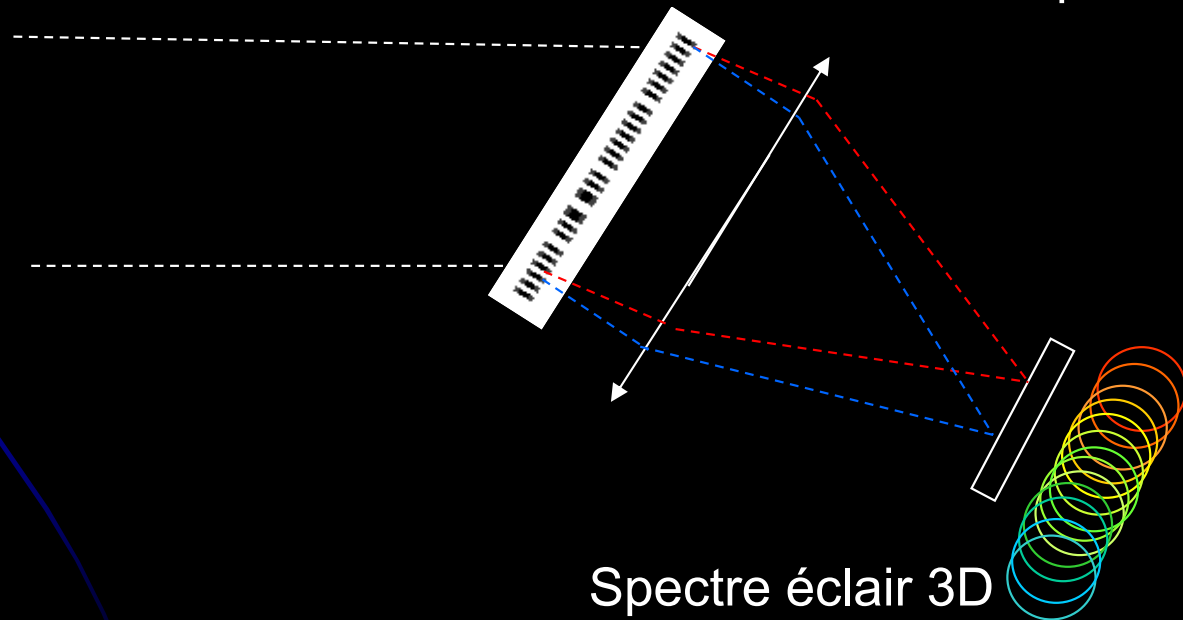
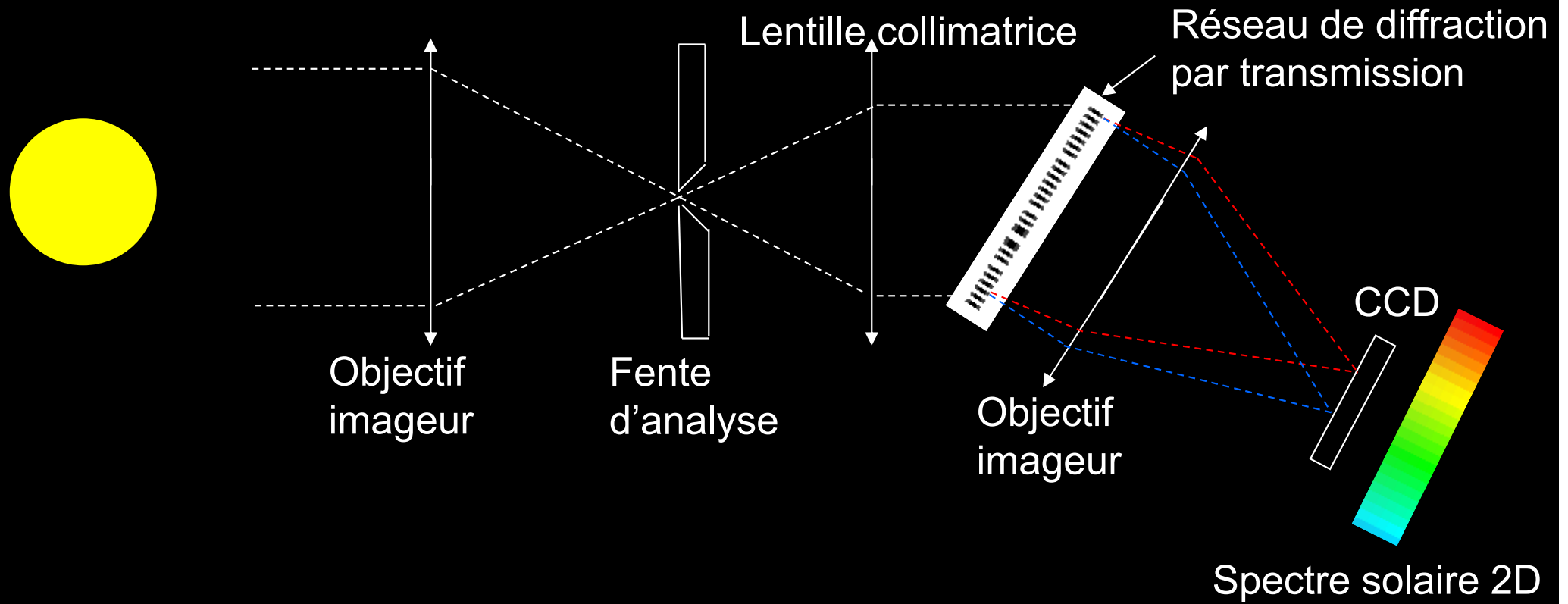


3<sup>ème</sup> contact (fin totalité)



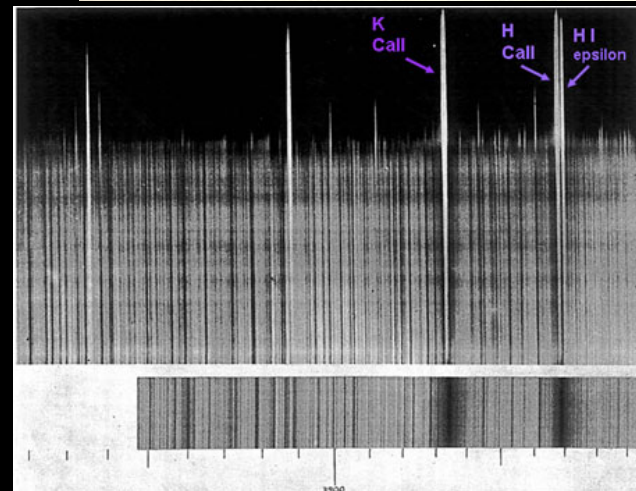
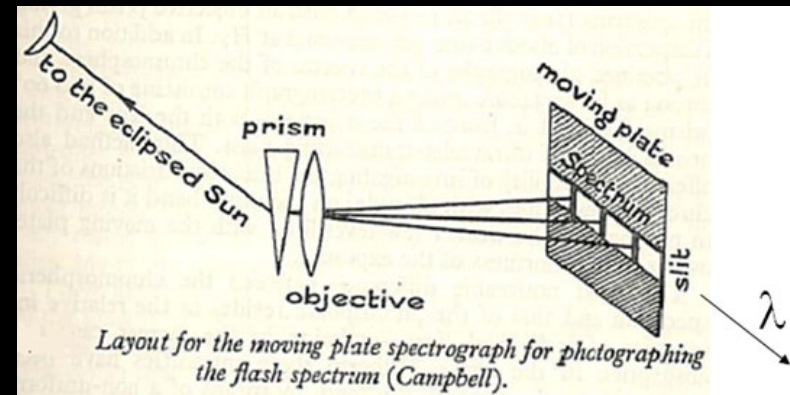
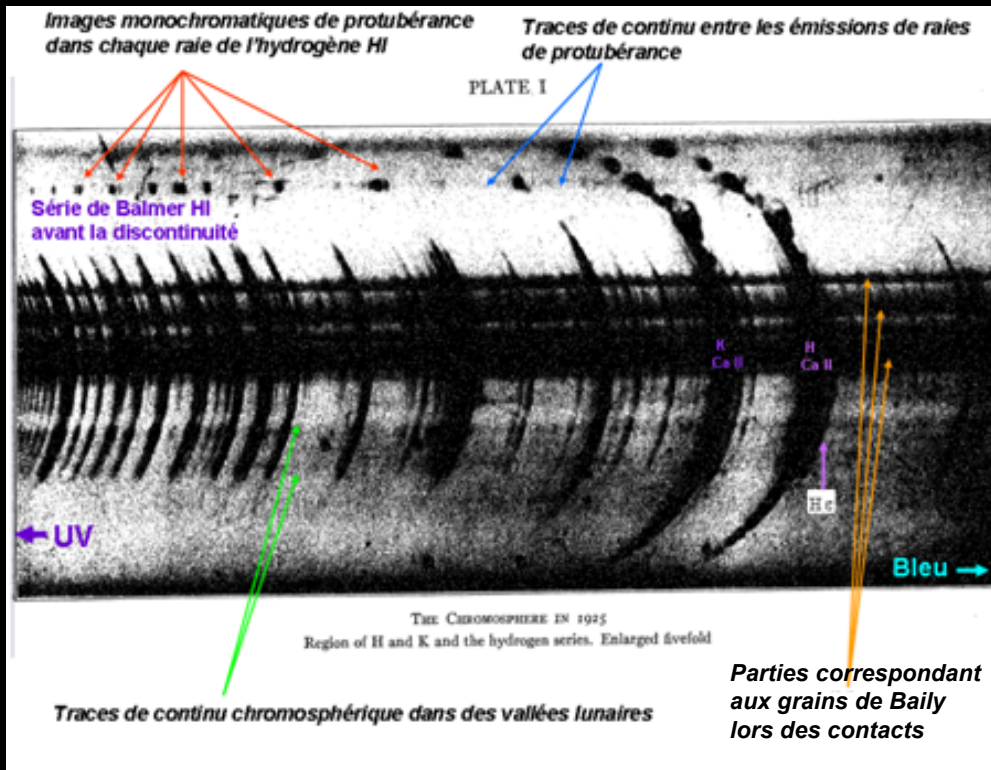
Hypothèse modèle hydrostatique stratifié (VAL)

# Schémas spectrographes à fente et sans fente



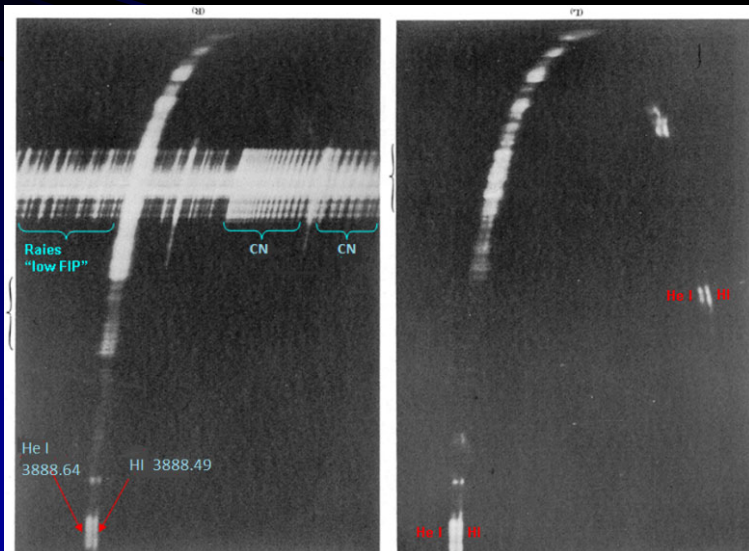


# Historique : spectroscopie aux éclipses totales de Soleil



Spectre éclair  
30/08/1905  
Sur plaques mobiles:  
15 mm/s  
D.H. Menzel,  
W.W. Campbell

Mitchell et al 1925 (dans l'UV):  
1 spectre sans fente/contact sur plaque photo

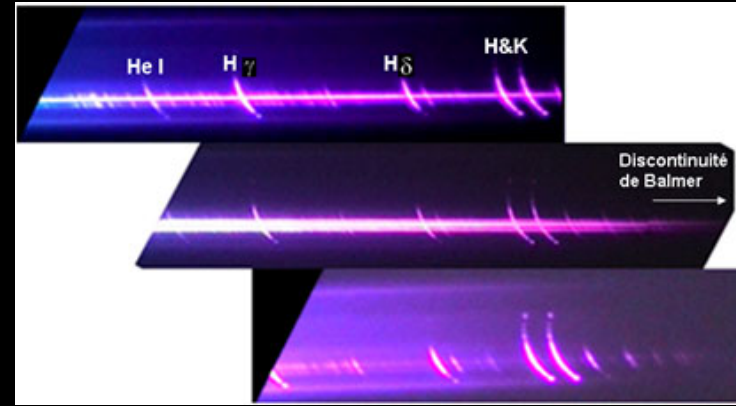
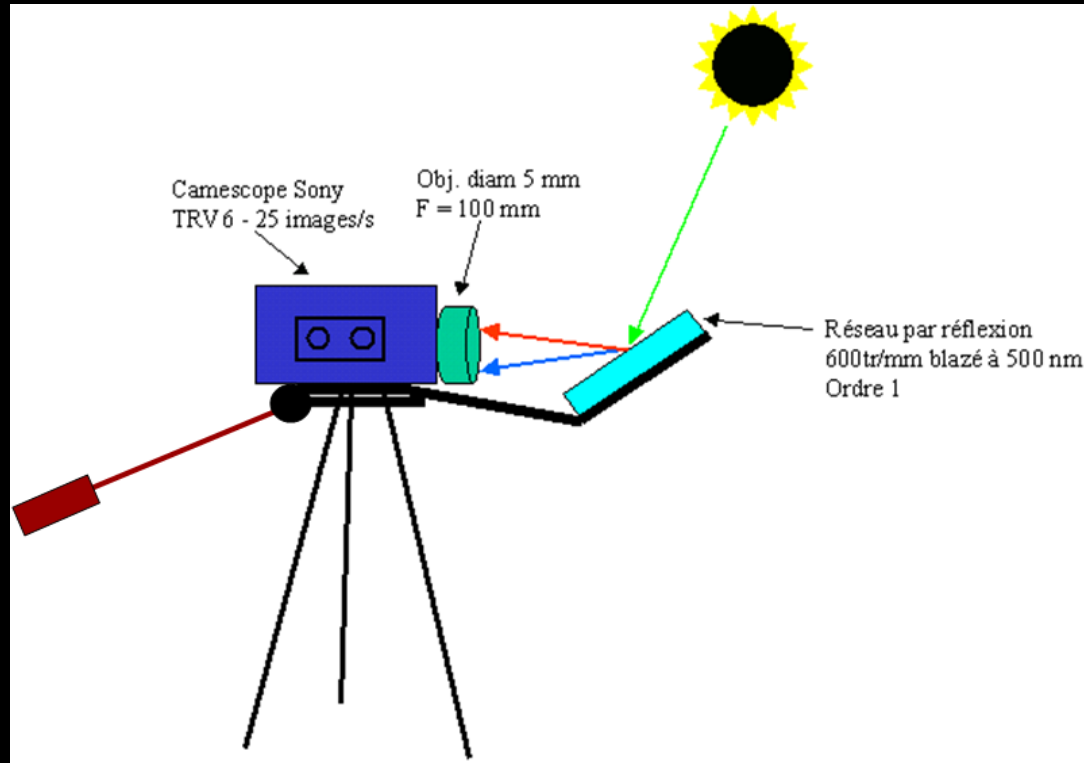


Hiei, 1963 (dans l'UV): 2 spectres sans fente/contact

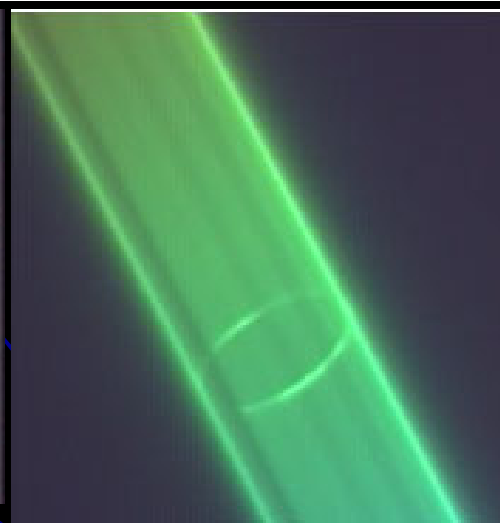
## Quelques avancées scientifiques marquantes:

- Arcs plus intenses (H $\beta$ ; He; Ca II..)  $\leftrightarrow$  raies formées dans la chromosphère
- Raie He II 4686 détectée (éclipses): photo-ionisation par les X-UV coronaux ? (encore controversé: rôle des  $e^-$  énergétiques ?)
- Milieu interspiculaire en « contact » avec la couronne: cellules de supergranulation et de méso-granulation
- Chromosphère composée de spicules dynamiques avec gaine,  $h > 1000$  km
- Modèles avec constriction (champ magnétique concentré aux frontières de supergranules)

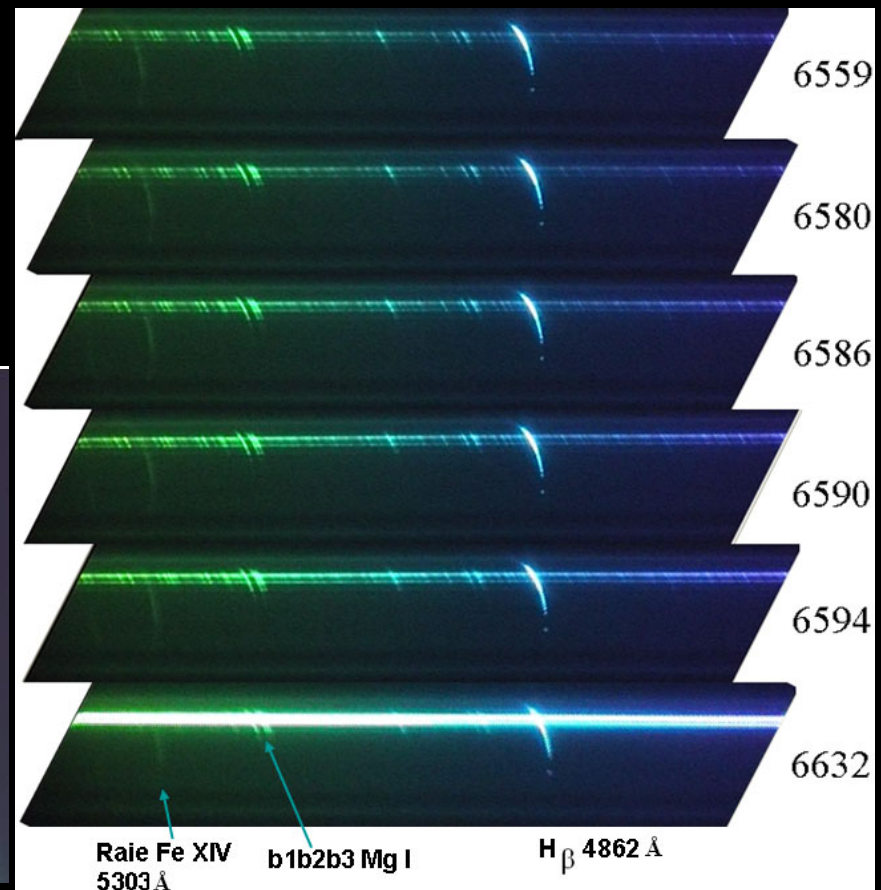
# Premiers essais éclipse 29/03/2006 à Side en Turquie



Couronne interne  
Ordre zéro

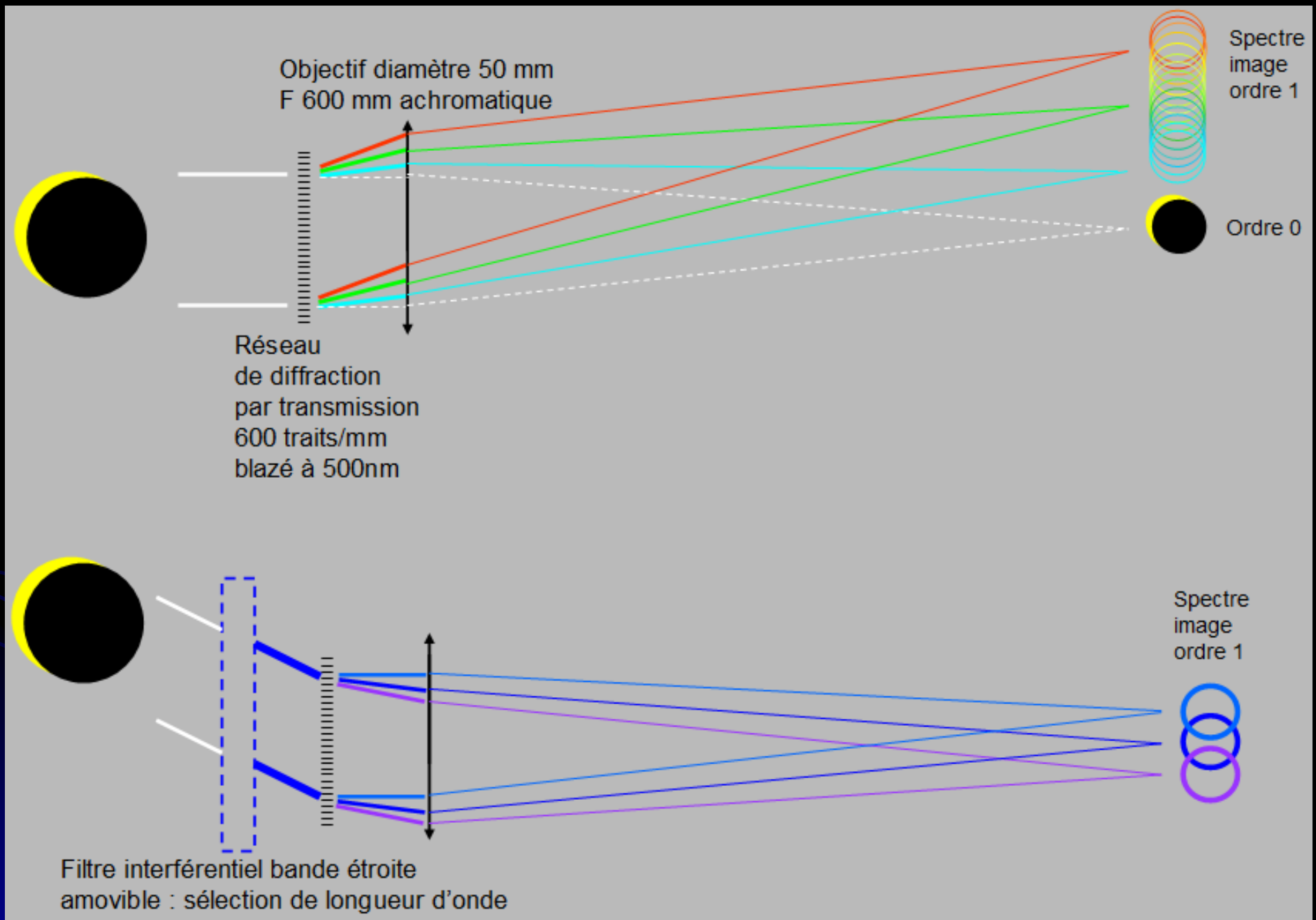


Fe XIV 5303  
Ordre 1





# Schémas du réseau-objectif utilisé aux spectres éclairs d'éclipses totales



# Pointage du spectre à l'ordre 1 au réseau – objectif :

pré-orientation du réseau 600 traits/mm devant l'objectif défini avec la carte synthétique des 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> contacts d'éclipse, sens de dispersion

Angle de 20 à 30° entre le Soleil et le spectre à l'ordre 1 dans le ciel

Utilisation d'une feuille blanche pour obtenir et projeter une partie du spectre coloré à l'ordre 1 sans la caméra

Centrage avec les flexibles de la monture équatoriale manuelle sans motorisation du domaine de longueur d'onde bleu-violet sur la feuille

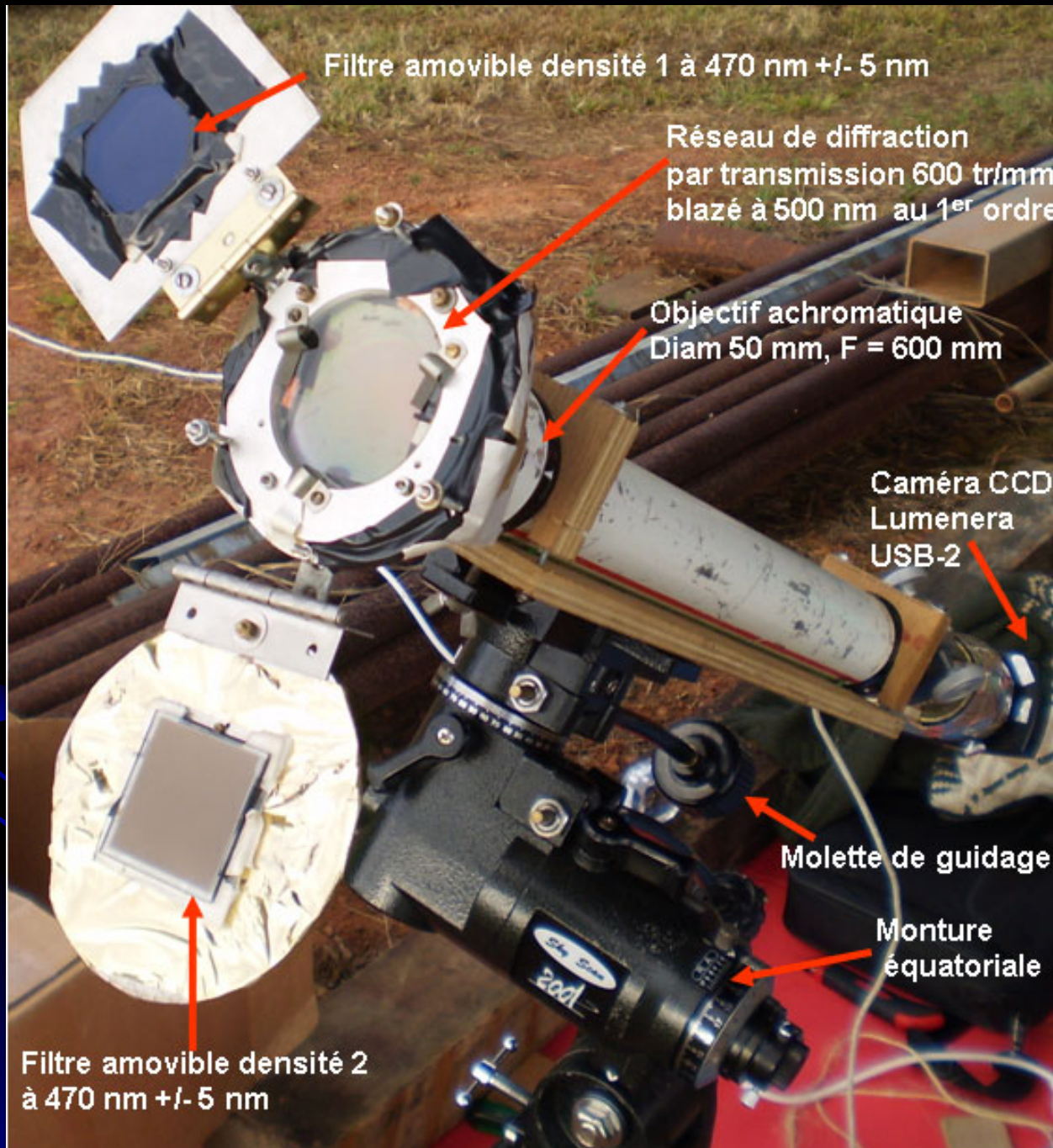
Apposition du filtre interférentiel à bande étroite + densité neutre devant le réseau spectre à l'ordre 1 et centrage du segment spectral.

Possibilité d'utiliser un écran autour du tube de la lunette

Installation de la caméra CCD pour visualiser et suivre le segment spectral lors des phases partielles à l'écran d'ordinateur portable, enregistrement continu

Retirer les filtres amovibles à la fin des phases partielles – ciel assombri

# Résultats antérieurs : éclipses 22/07/2009, 11/07/2010 et 03/11/2013

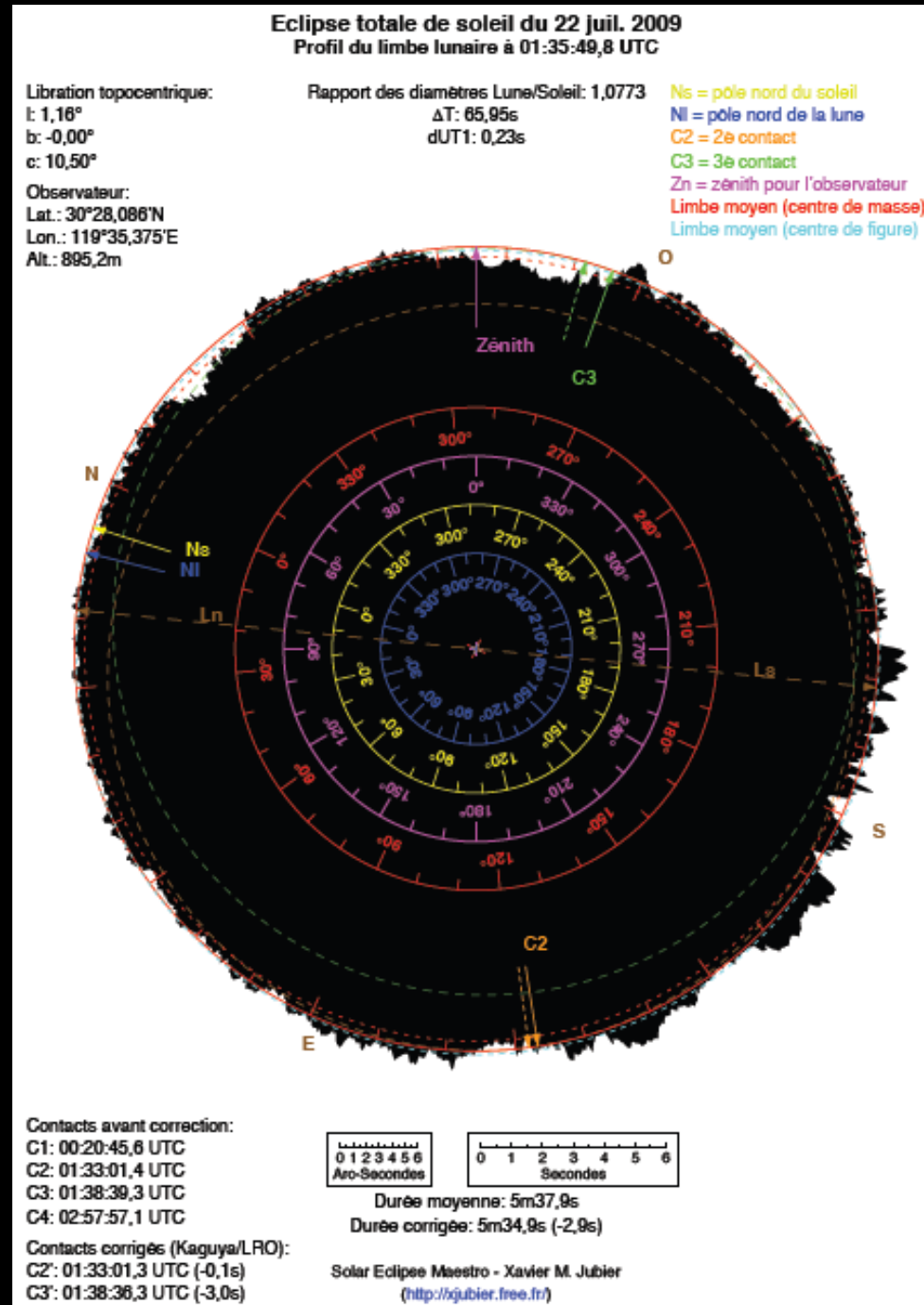
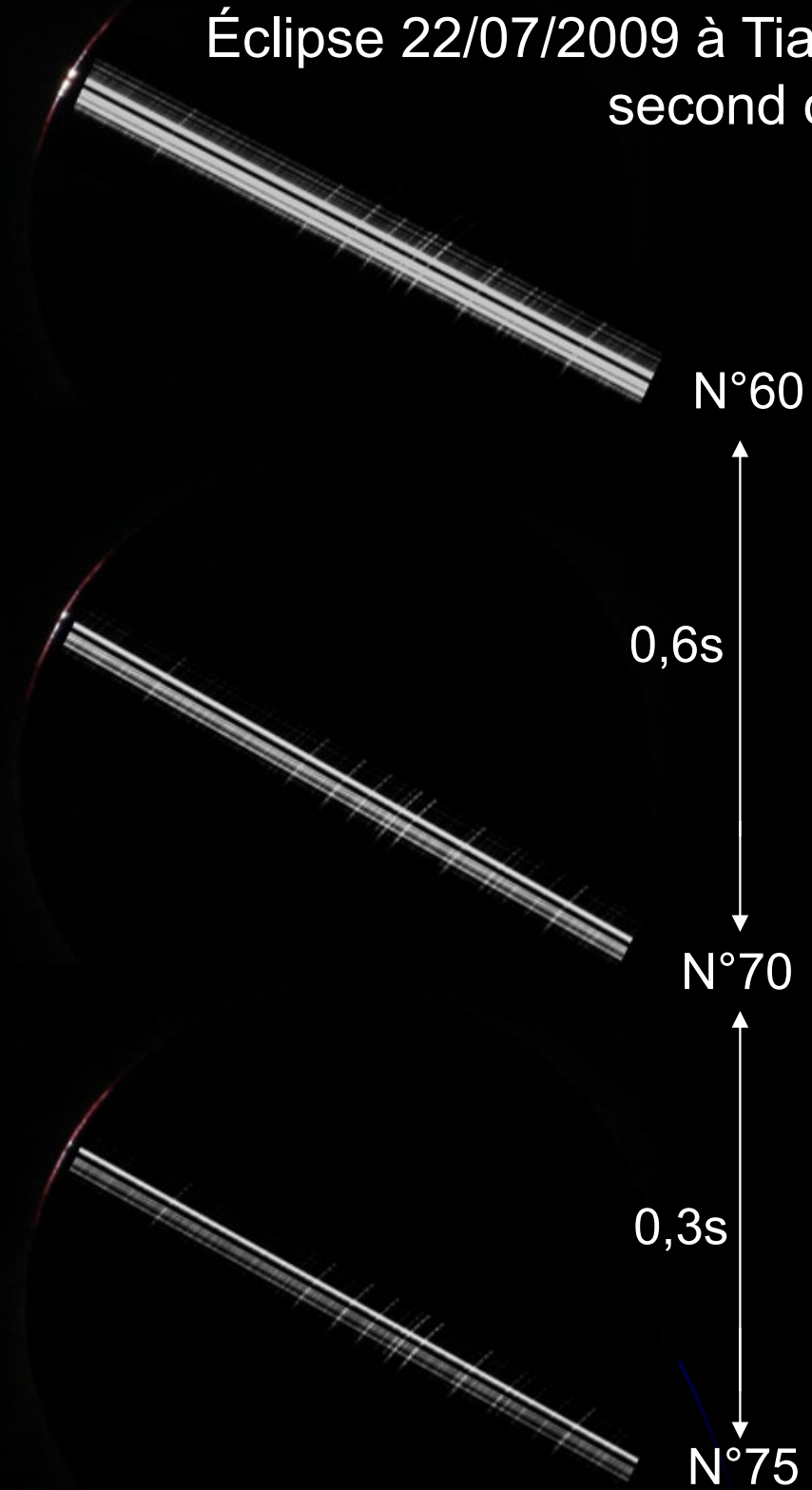


## Dispositif

Temps de pose  
50ms Gain 1  
Acquisition  
Lucam Recorder  
en continu 15im/s  
1392x1040 pixels  
Pixel 4,6 $\mu$  – 12 bit  
CCD Skynyx 2.1 M  
Domaine spectral :  
470 nm +/- 5 nm  
Dispersion :  
0,12 Å /pixel  
Échantillonnage :  
1,1 Mm/pixel



# Éclipse 22/07/2009 à Tianhuanping – Chine durée totalité ~ 5 min 30 s second contact C2



# Raies Low First Ionisation Potential

Raies d'excitation de potentiel inférieur à 10 eV : raies métalliques

Fe I : 1,48 eV ; Fe II : 2,84 eV ; Ti I : 0,85 eV ; Ti II : 1,12 eV ; Ba II : 2,72 eV ..

# Raies High First Ionisation Potential

Raies de potentiel supérieur à 10 eV : raies de l'hydrogène, hélium, gaz rares

He I : 24 eV ; He II : 54 eV ; H I : 13,6 eV ; Ne I : 21,56 eV ..

myriades de transitions des raies présentes :  
basses couches de l'atmosphère solaire, minimum de température et au-delà

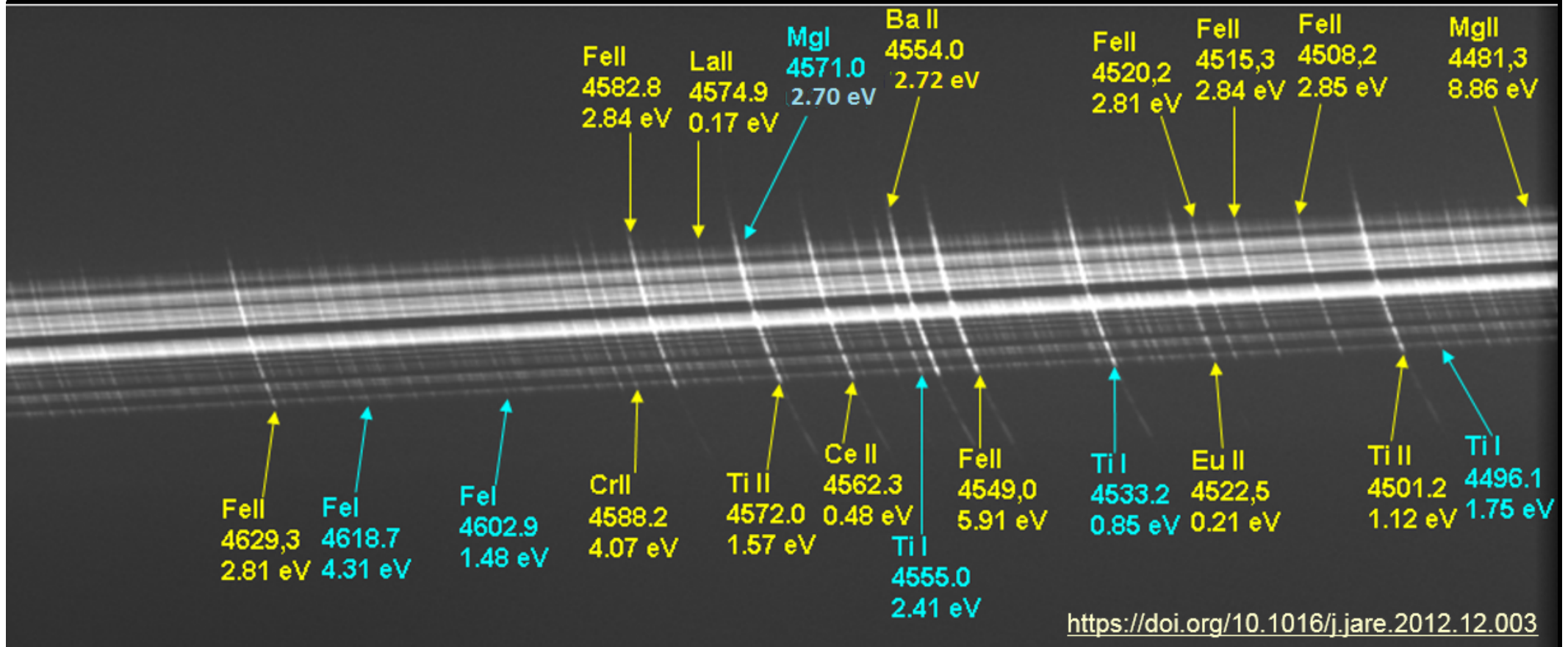
Taux d'excitation - ionisation caractéristiques de chaque élément

Séparation neutres et ions :

Laming 2015 : FIP and inverse FIP effects in solar and stellar corona



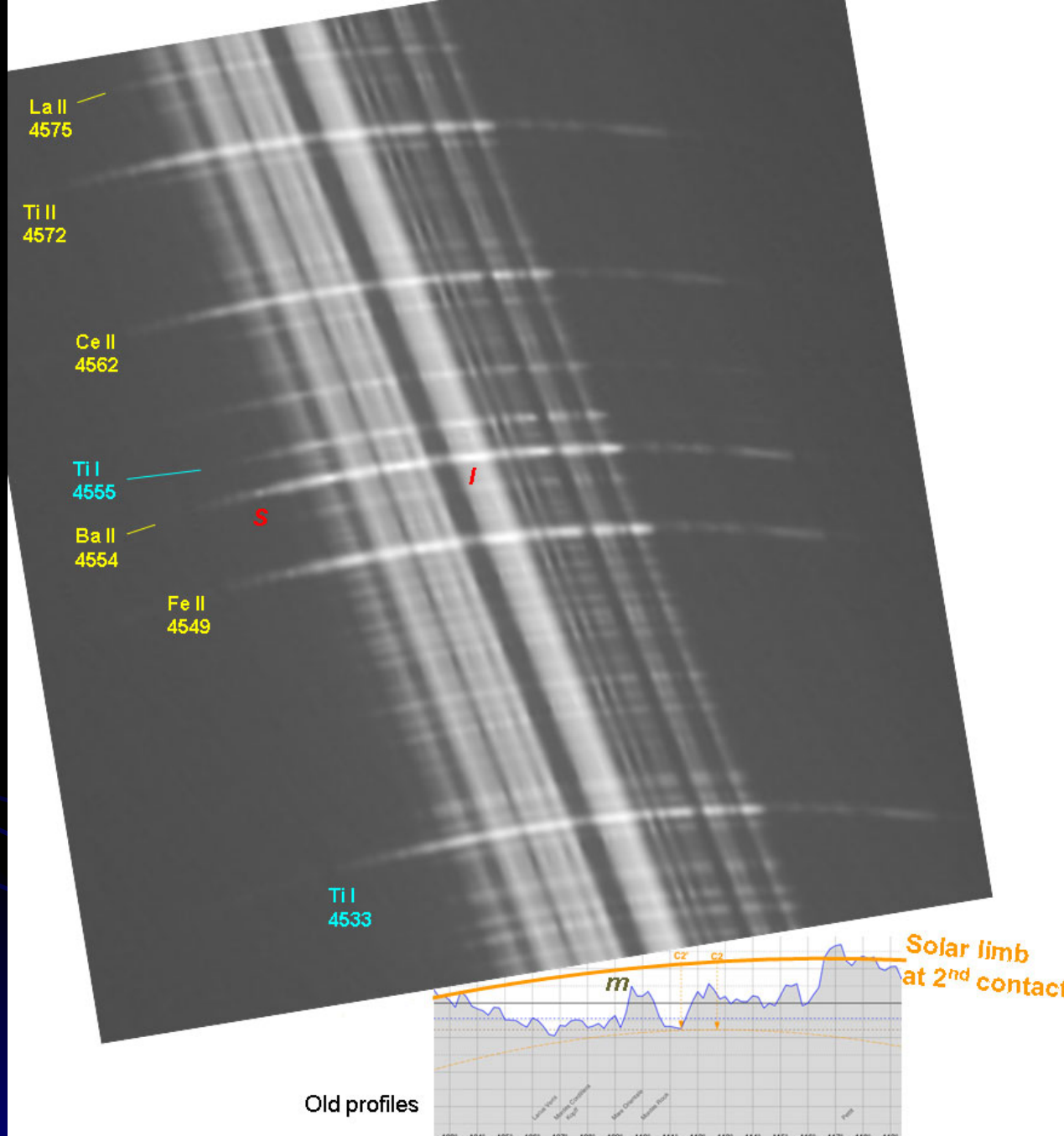
# Éclipse 22/07/2009 second contact avec raies Low First Ionisation Potential



extrait de spectre éclair lors du second contact à l'éclipse du 22 Juillet 2009, montrant les myriades de raies low FIP dans le domaine spectral de 4480 à 4640 Å. Le continu du spectre du grain de Baily central plus intense est visible, et correspond à la fin du continu photosphérique où commence la mésosphère. La trace blanche correspondant au continu intense (grains de Baily) correspond à la référence où l'altitude maximale est prise. Les potentiels d'excitation sont indiqués en eV

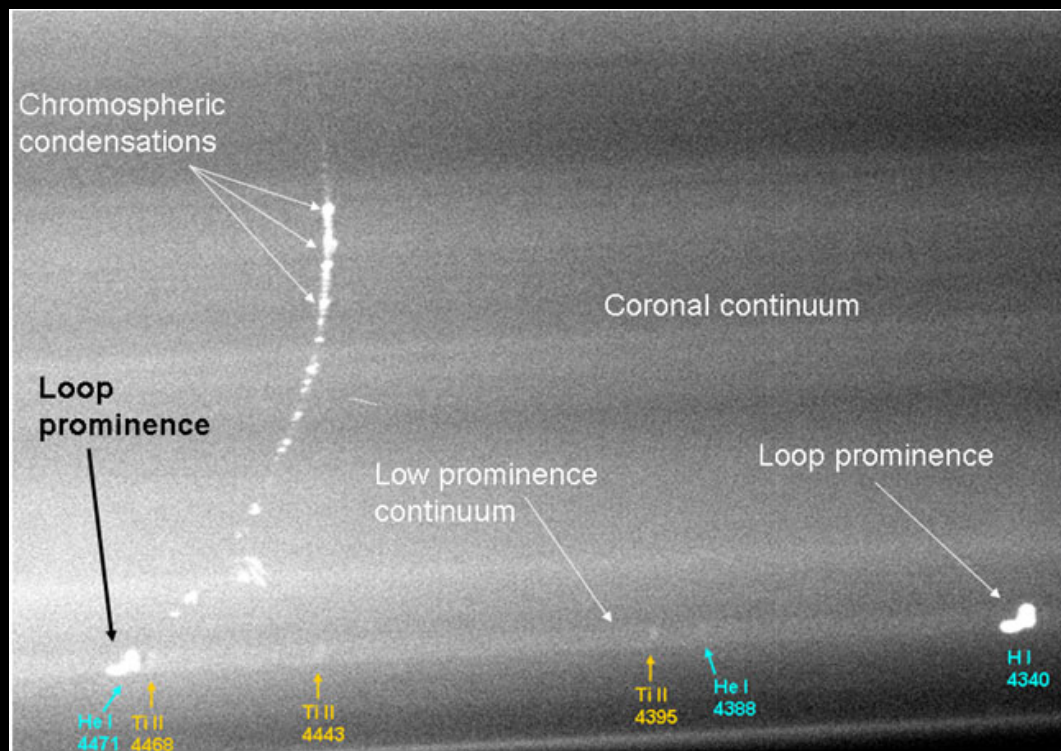
Durée des spectres éclairs ~10s aux 2iem et 3iem contacts  
Séquence avec arcs fins ~ 3s

Observation instantanée

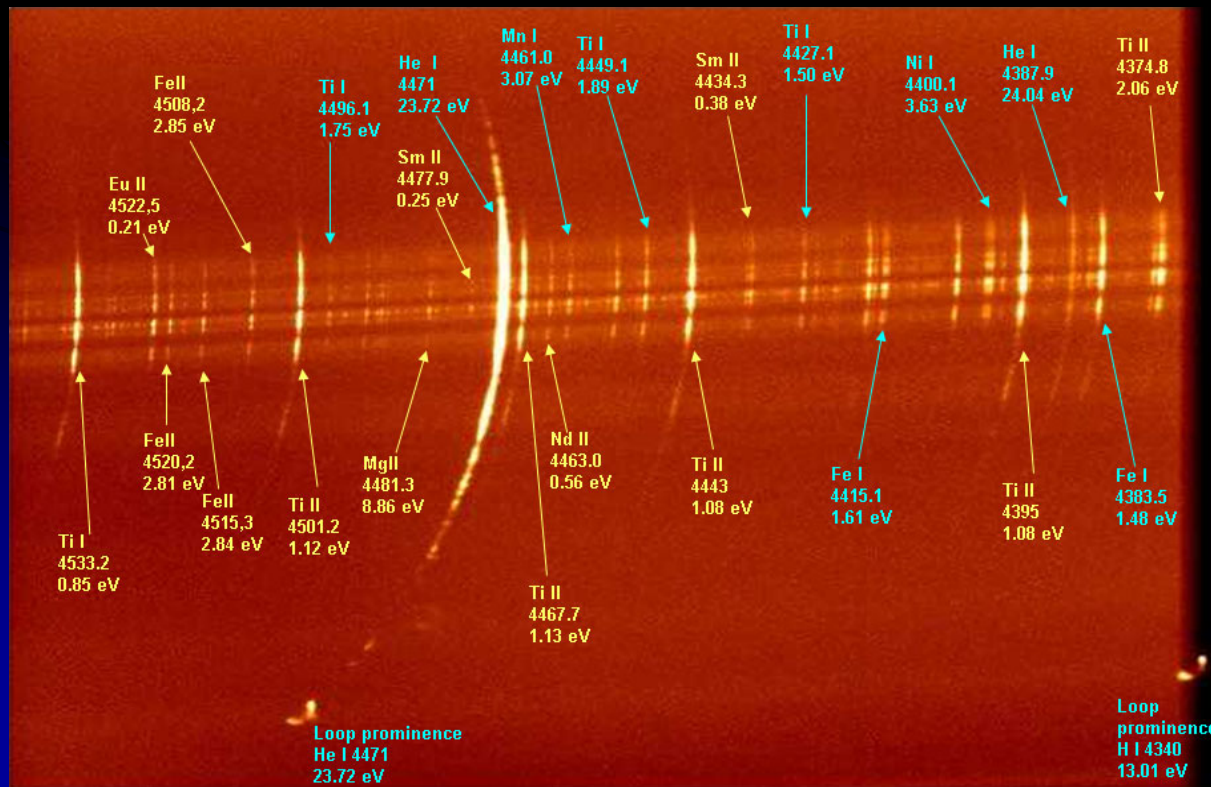


Spectre-images agrandies  
 dans les arcs très fins  
 des raies  
 Second contact  
 Grains de Baily non saturés

*Corrélations entre le relief Lunaire et les profils agrandis 4 fois des spectres des raies low FIP, et continu. 60 spectres éclairs sommés non redressés quelques secondes après le deuxième contact avant le début de la totalité, de N° 60: 1h 32 min et 34.4 seconde à N°120: 1h 32 min et 38.4 seconde. Les altitudes correspondantes sont de 619 à 2197 km au dessus du limbe. Eclipse totale du 22 Juillet 2009*



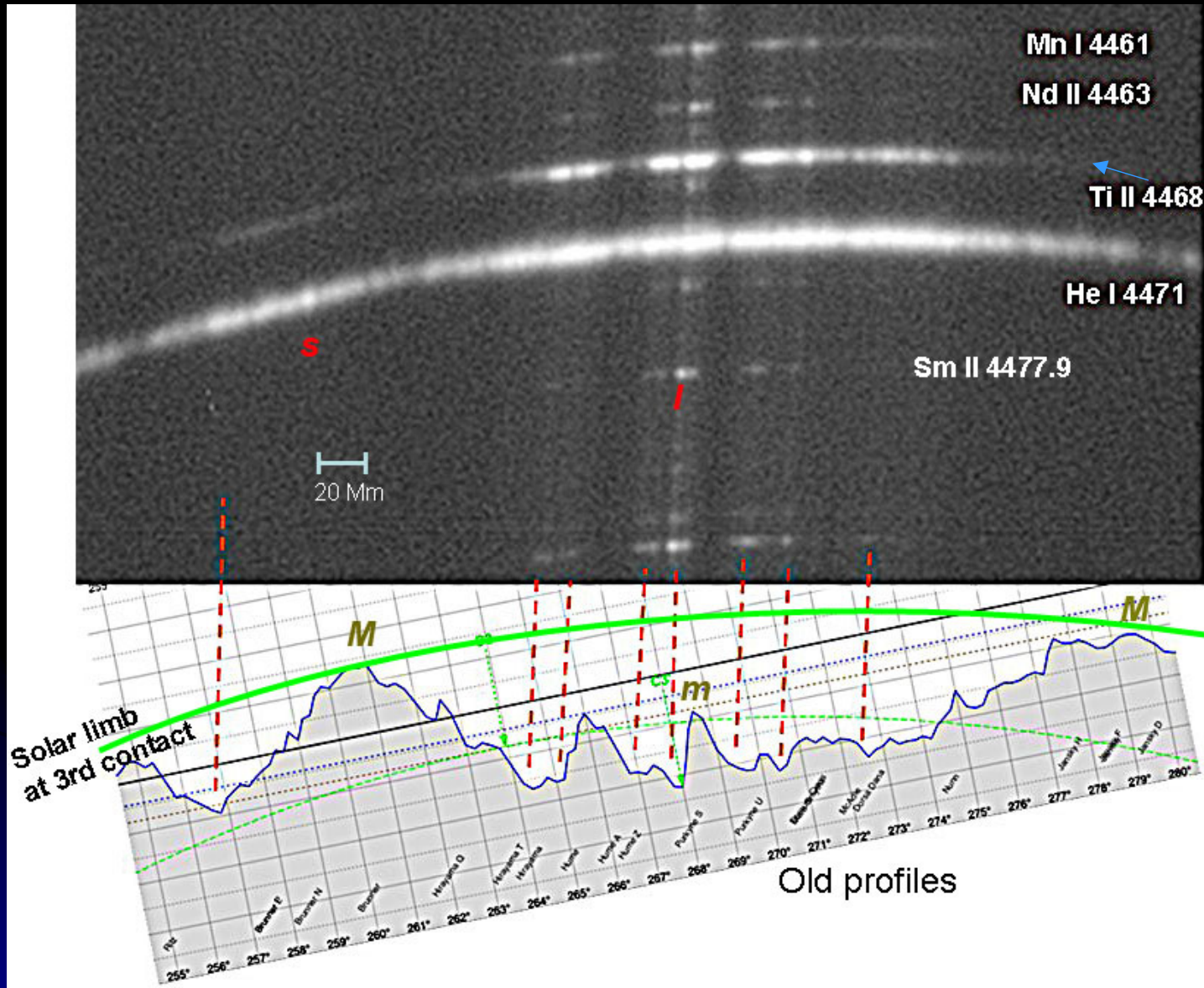
Protubérance « low FIP » et « high FIP »  
 et interfaces Pr-C/I  
 Continu entre protubérance  
 Continu coronal  
 (avant le 3ième contact  
 de l'éclipse du 22 Juillet 2009)



Proche du troisième contact  
 Enveloppes de plasma  
 Raies low First ionisation  
 Potential – FIP  
 Protubérance en boucle  
 dans la raie He I 4471 Å



# Spectre éclair troisième contact C3: sondage des couches interface Photosphère-couronne et la chromosphère Macro-spicules He 4471 Å



**Corrélation entre Ti II ( low FIP)  
et He I ( high FIP)  
pour les hauteurs où les détails  
du profil lunaire  
sont déterminants  
Intégration de détails différents  
sur la ligne de visée**

- Ti II dominé par les collisions plus bas
- He I plus haut dominé par photo-ionisation par les EUV coronaux

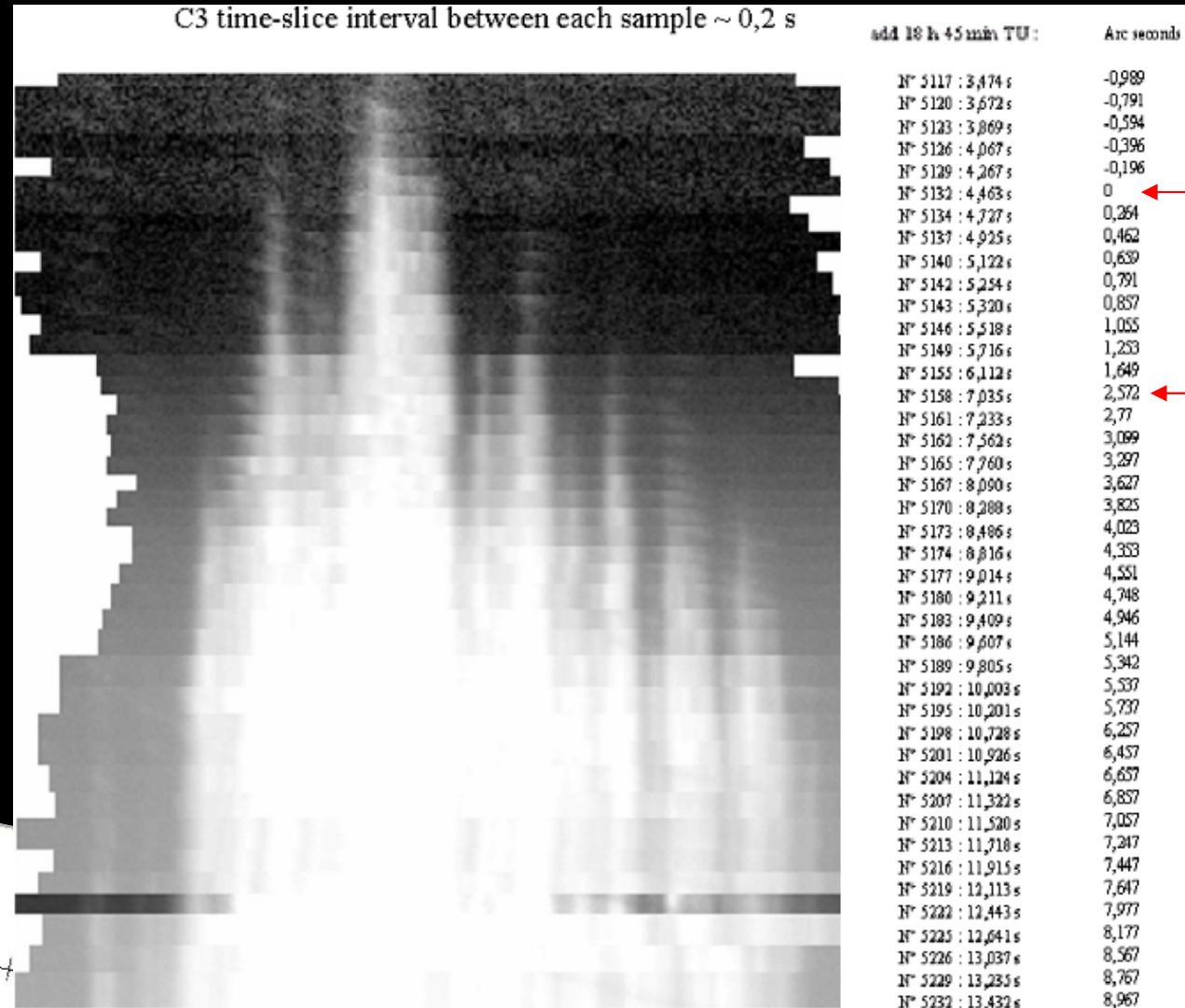
Corrélations entre le relief Lunaire et les profils agrandis des spectres des raies low FIP, enveloppe d'hélium He I 4471 Å, et continu de 18 spectres éclairs sommés  
Les instants étaient entre 1h 38 min et 29.5 seconde à 1h 38 min et 30.0 seconde, qui correspondent aux altitudes de 1776 à 1555 km avant le 3ième contact de l'éclipse totale du 22 Juillet 2009.

# Résultats obtenus à l'éclipse du 11/07/2010 (Hao – Polynésie) :

« Vrai » bord solaire observé au-delà du limbe édenté de la Lune au 3<sup>ème</sup> contact, « grain de Bailly »

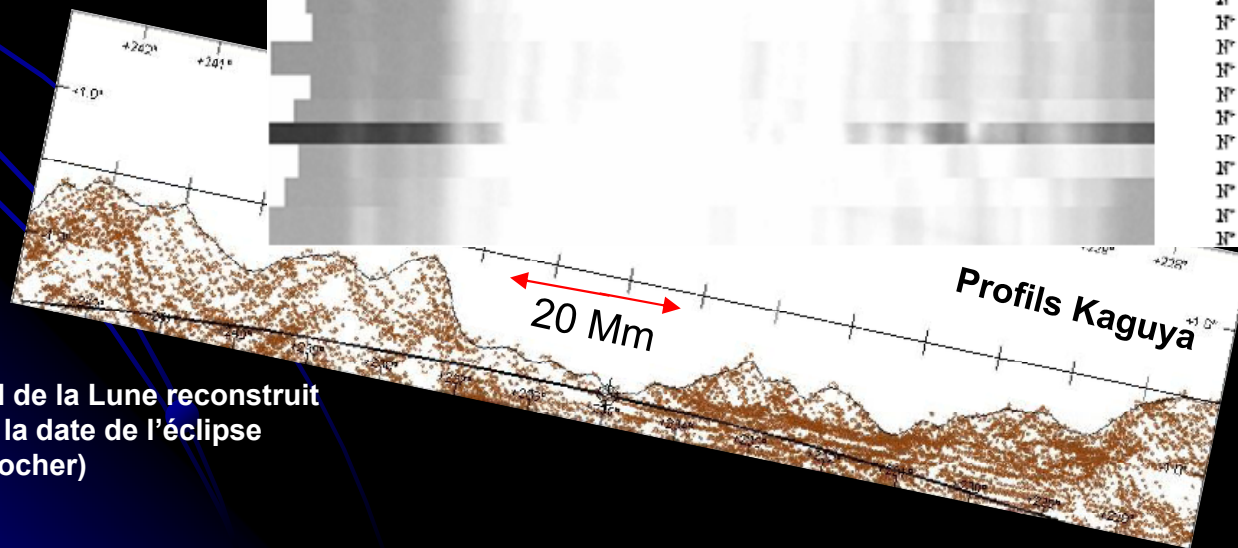
Extraction sur chaque spectre éclair d'une tranche de 1.5 Å de large autour de 4700 Å (pseudo-continu) Dans la séquence temporelle

Grâce à la chronodatation, comparaison des "instants de contact" avec les calculs IMCCE: définition du bord solaire pas de point d'inflexion



Disparition du dernier grain de Bailly

Valeur du diam solaire moyen utilisé dans les éphémérides

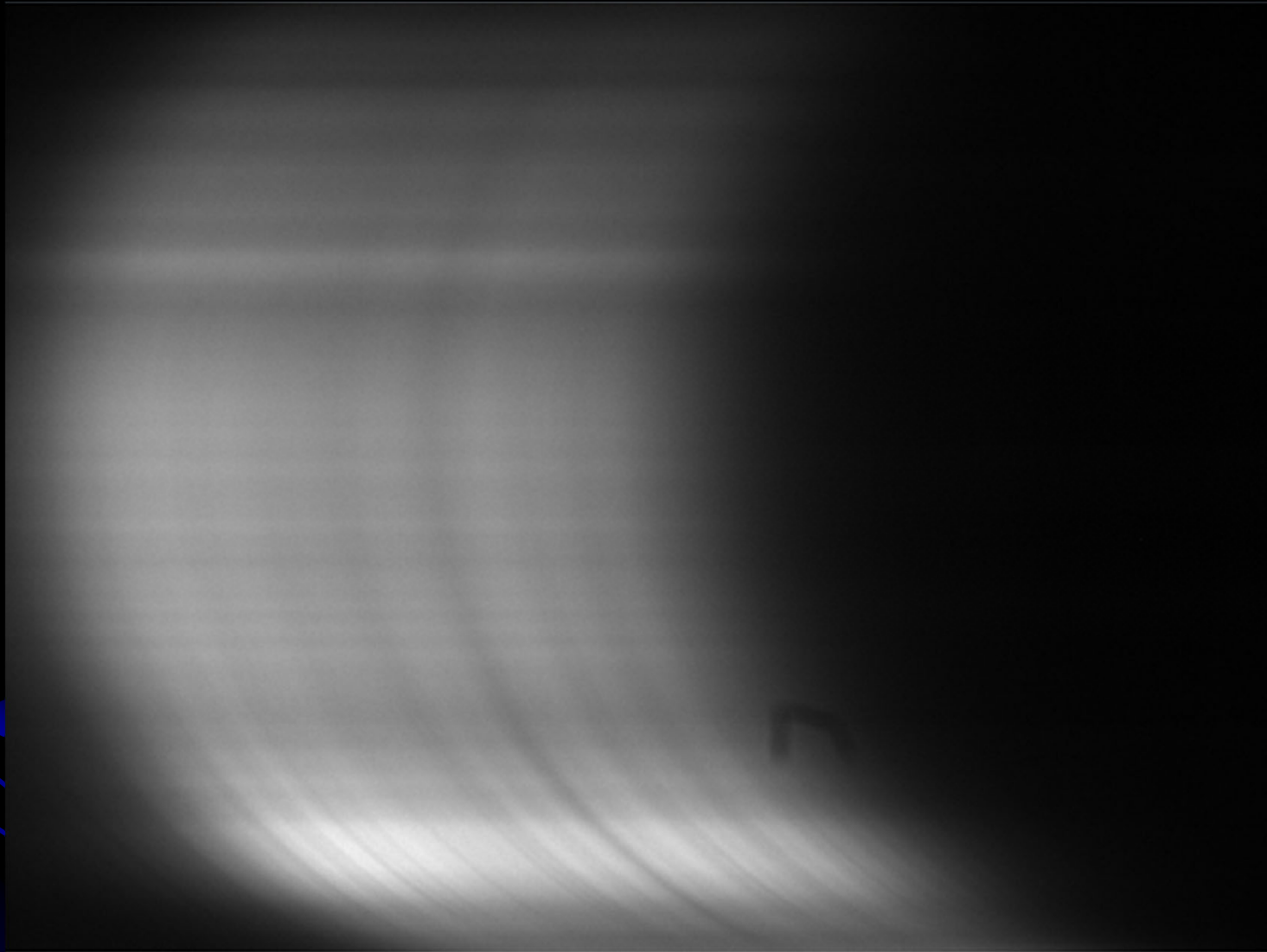


Profil de la Lune reconstruit pour la date de l'éclipse (P. Rocher)



# Eclipse du 3/11/2013 hybride durée 20s à Gulu Ouganda

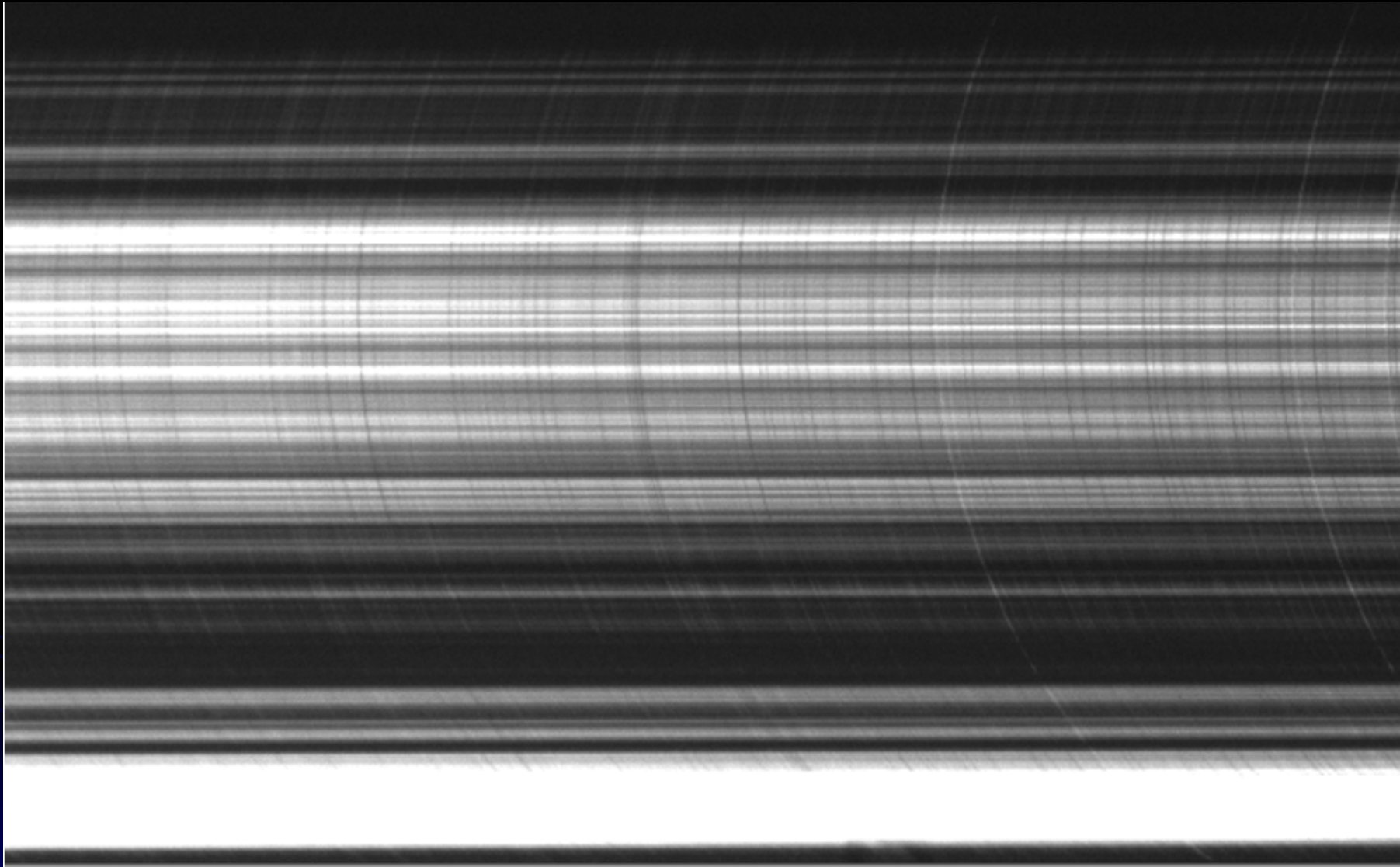
## Mêmes montage et paramètres d'acquisition



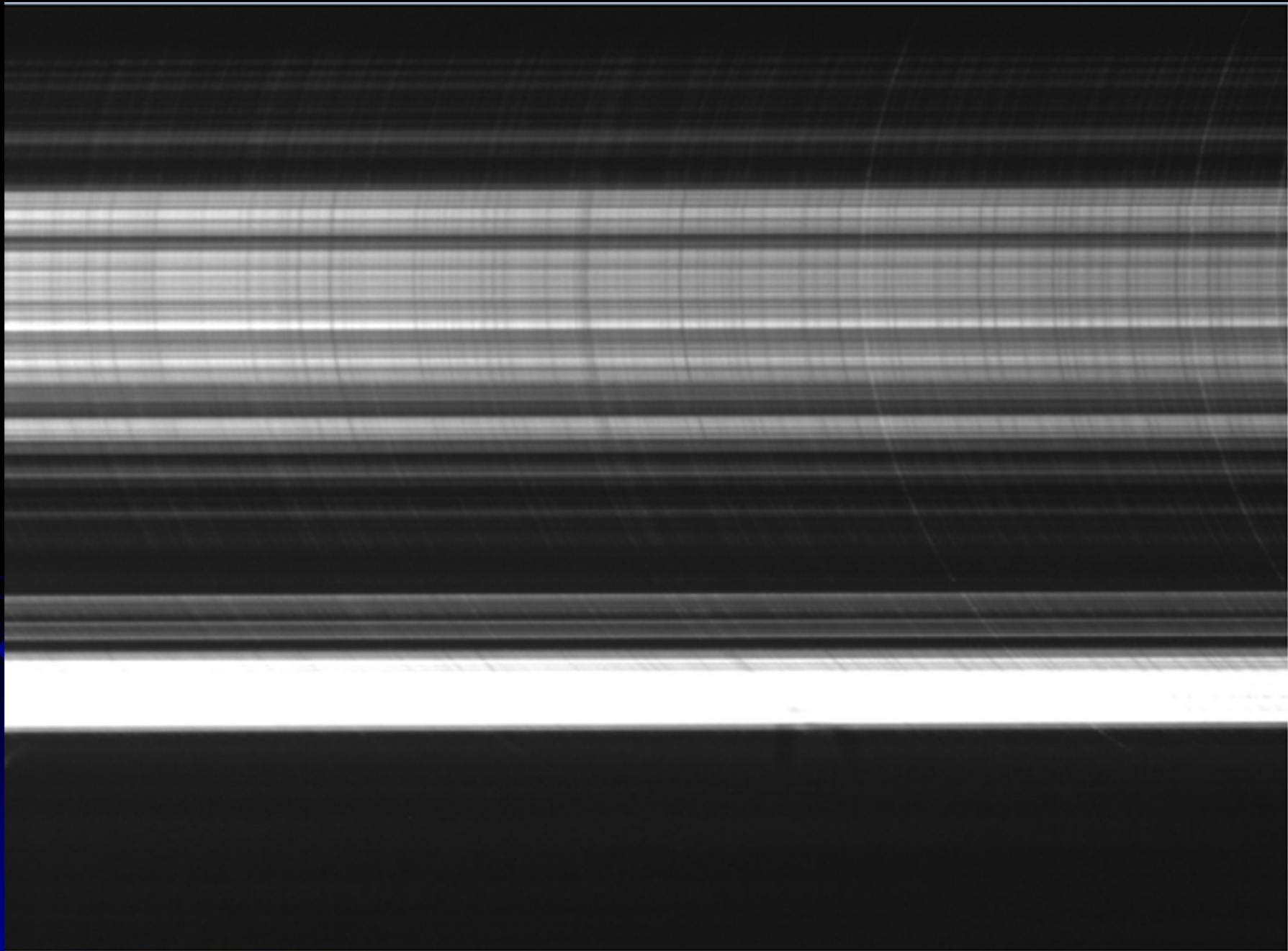
Fin croissant de photosphère largeur de  $\sim 10$  secondes d'arc

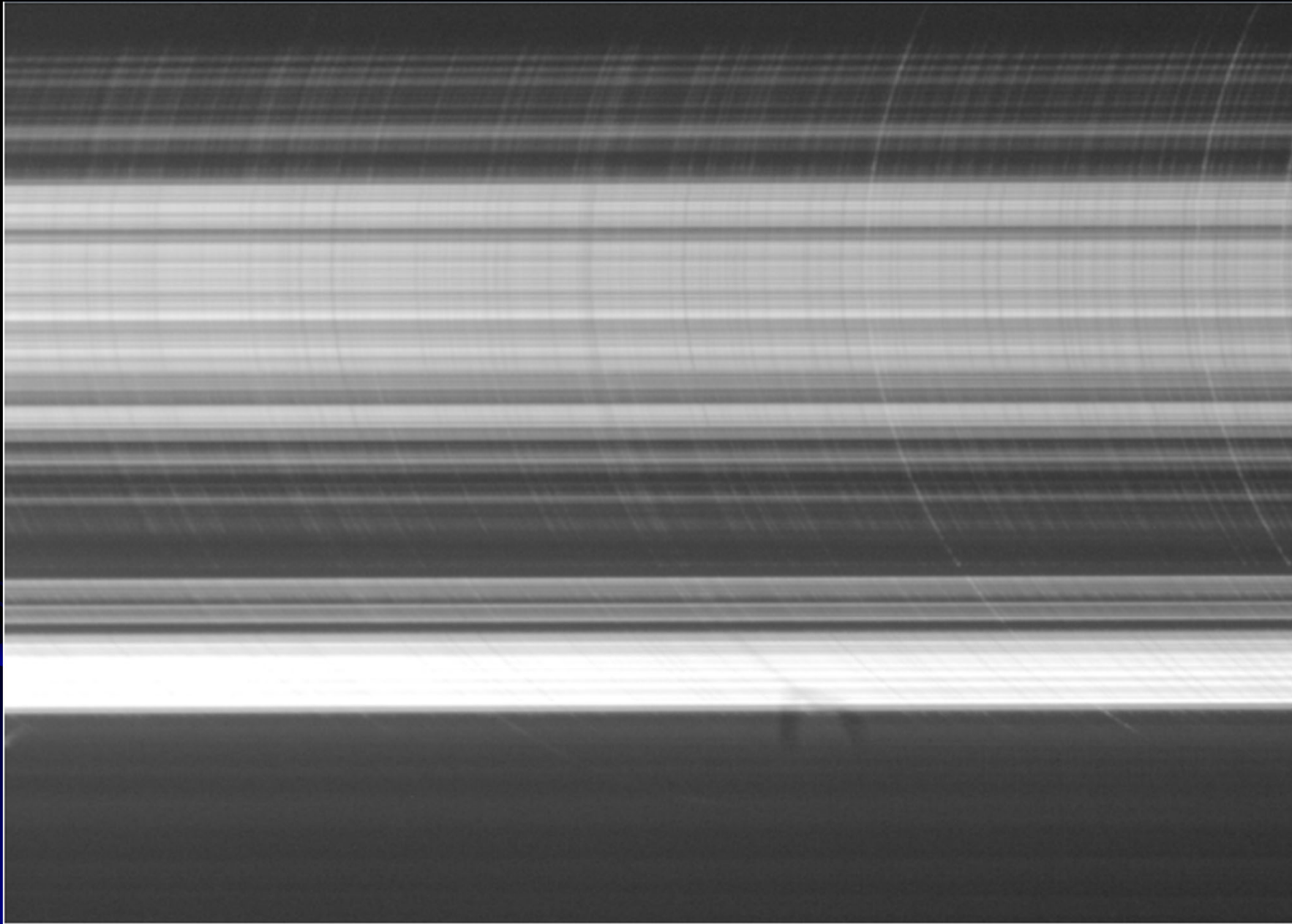
Frame N° 15800 à 21s avant le second contact, avant de retirer les filtres  
d'atténuation et de sélection de longueur d'onde à  $470 \pm 5$  nm

« segment spectral »



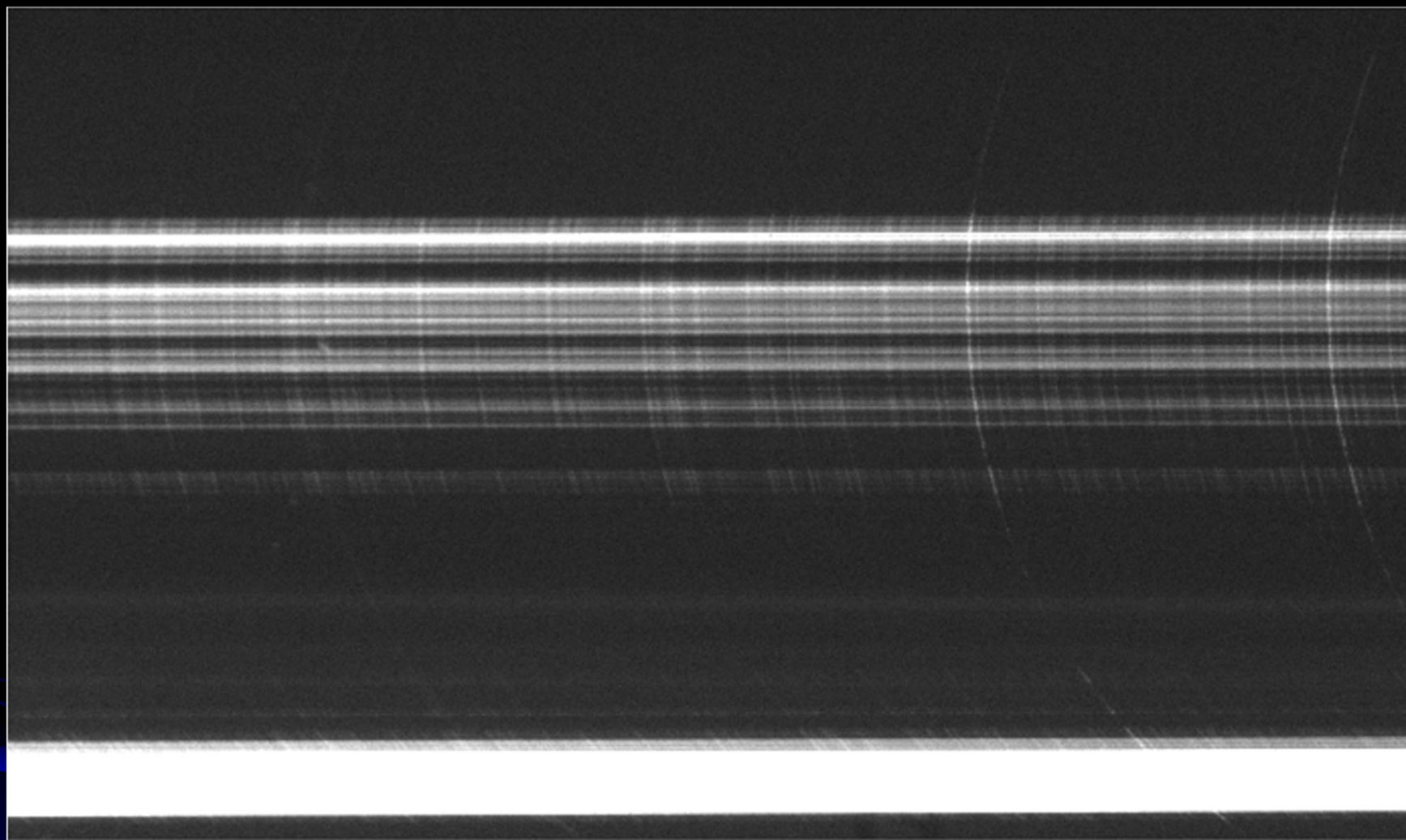
N° 16115 visualisation échelle linéaire niveaux 0 à 2401 ADU  
Spectre des grains de Bailly, après avoir retiré les filtres





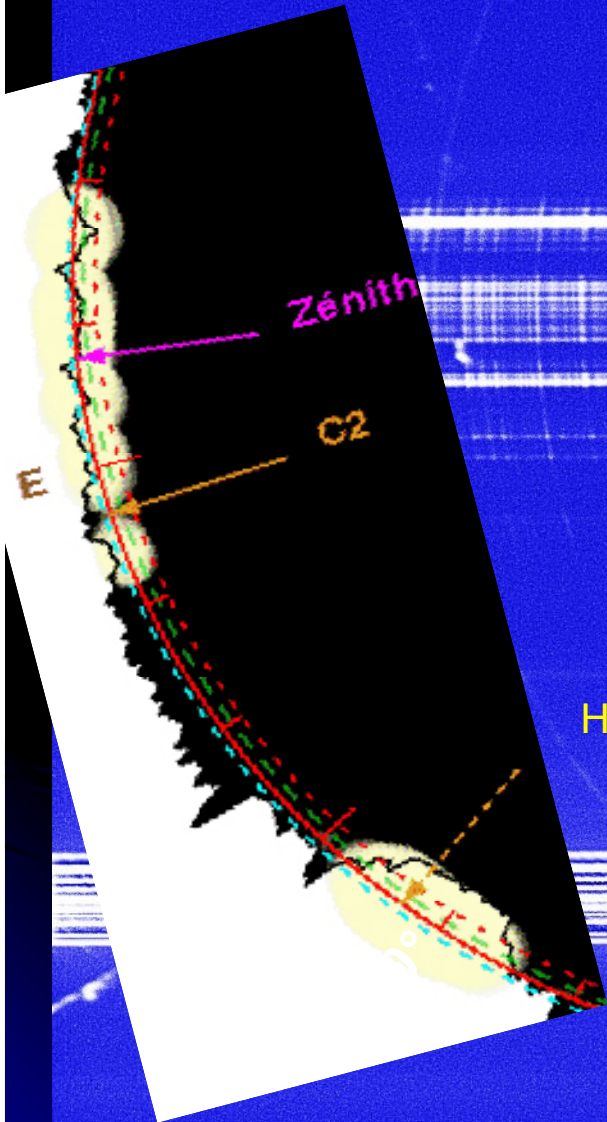
N° 16120 : Visualisation éch. Log





N°16150 visualisation éch. linéaire niveaux 0 – 960 ADU





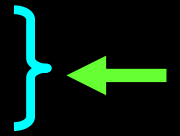
He I 4713

Mg I 4702

Fe II 4629

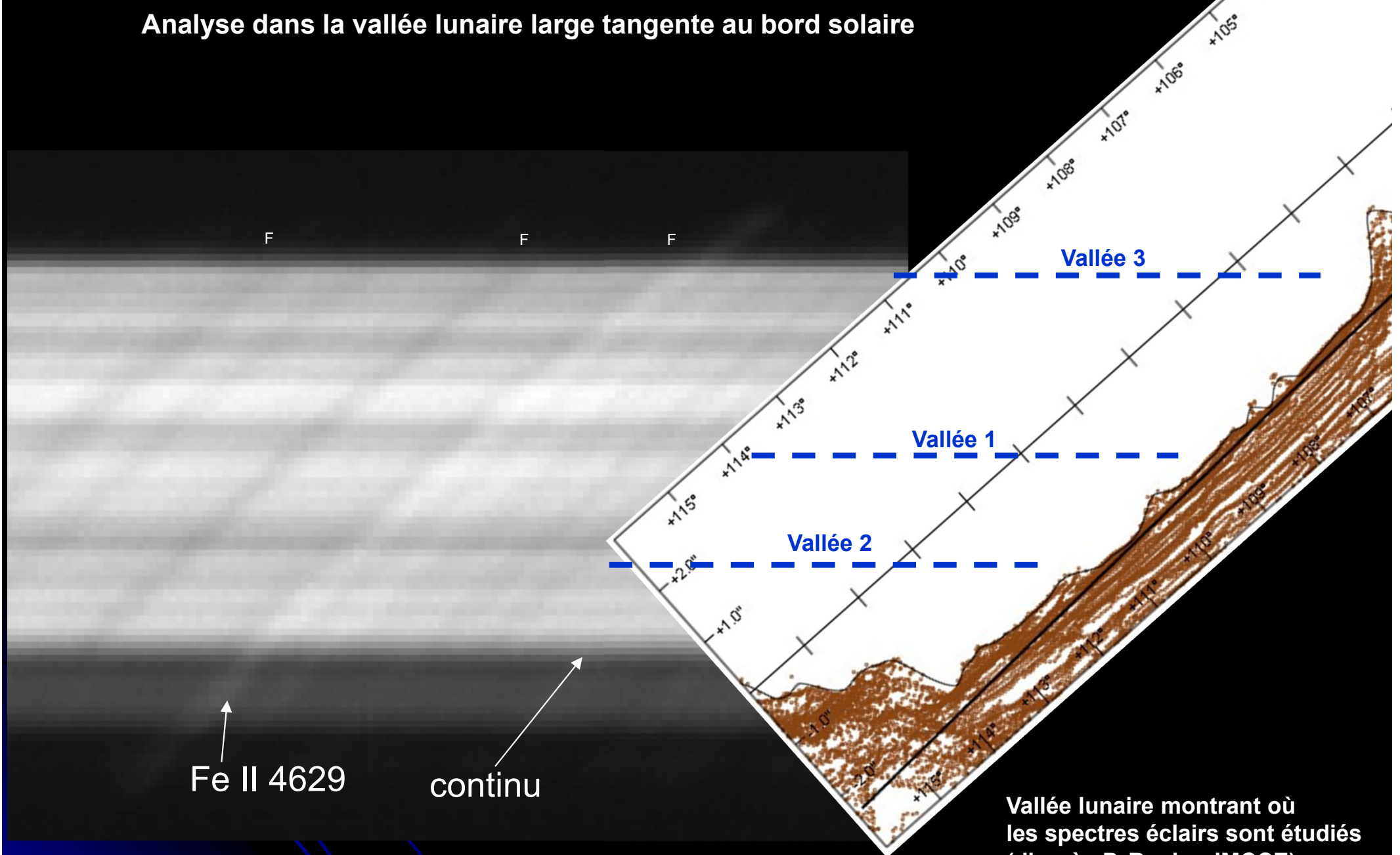
Fe II 4582

He II 4686





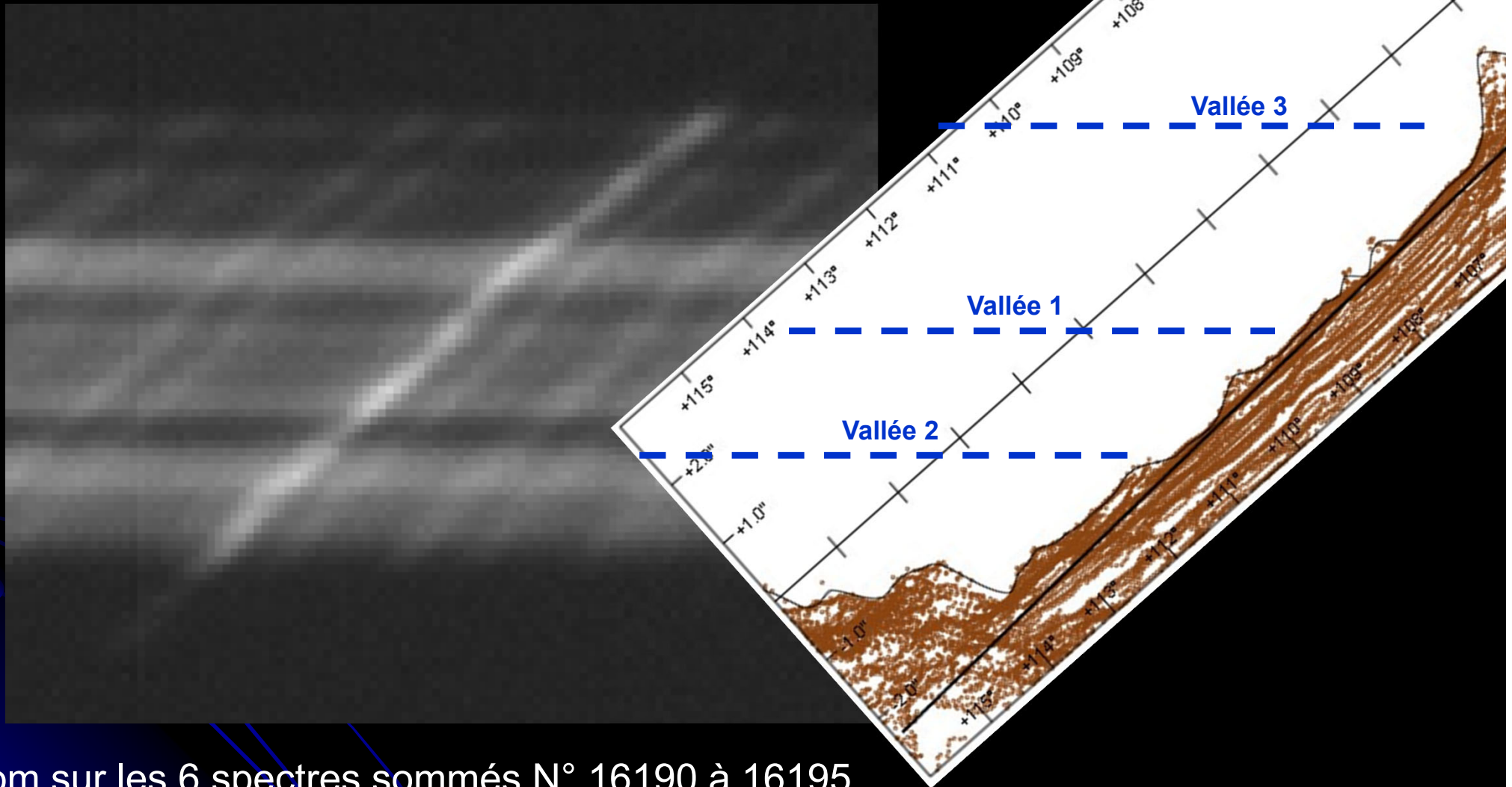
# Analyse dans la vallée lunaire large tangente au bord solaire



Zoom sur les 6 spectres sommés N° 16148 à 16153  
Entre les spectres consécutifs, il y a des fluctuations,



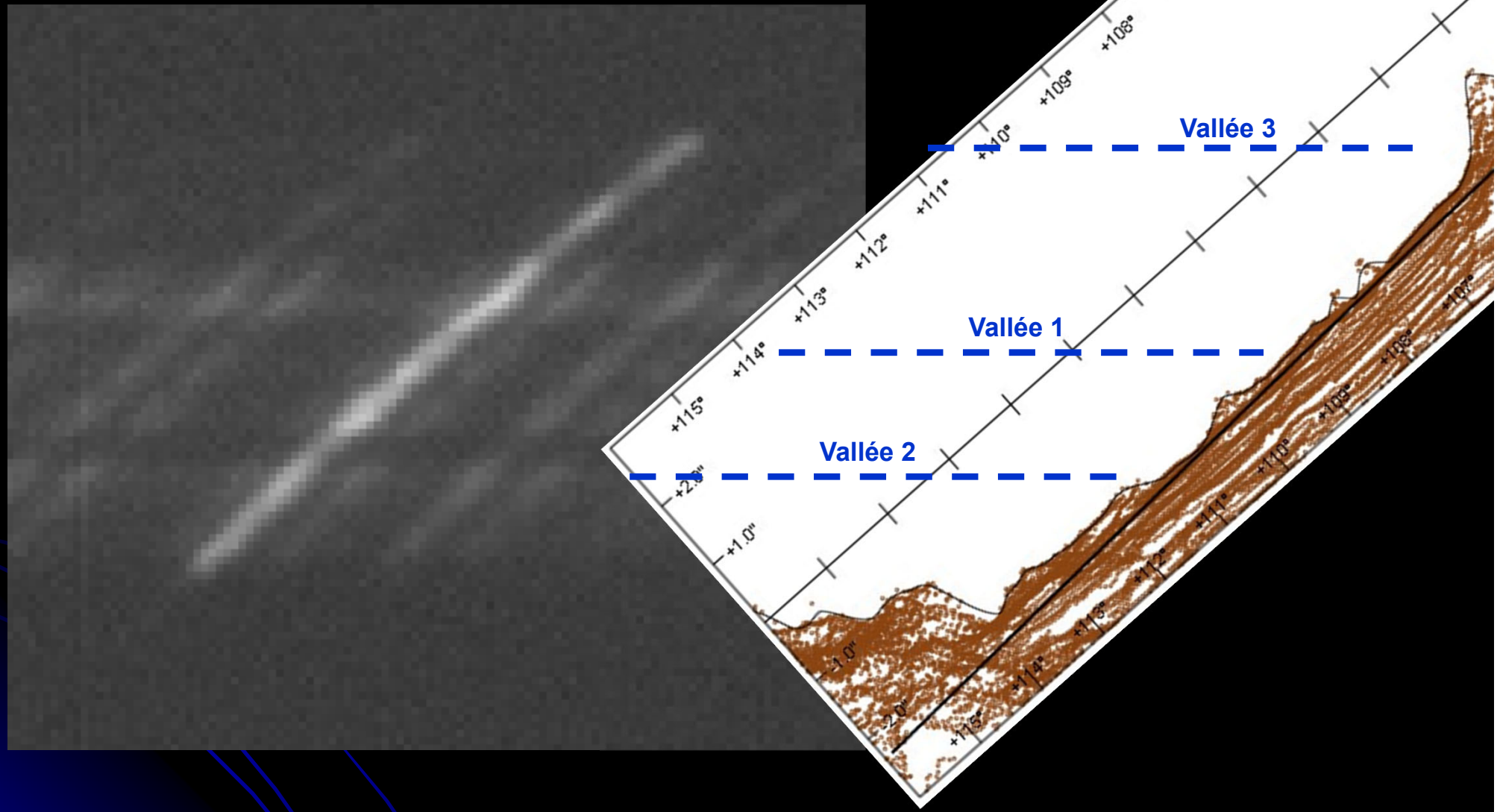
Ecart de 1,6 s par rapport à la précédente



Zoom sur les 6 spectres sommés N° 16190 à 16195  
seuils de visualisation 0 à 4201 adu  
Réajustement des niveaux d'intensités pour visualiser

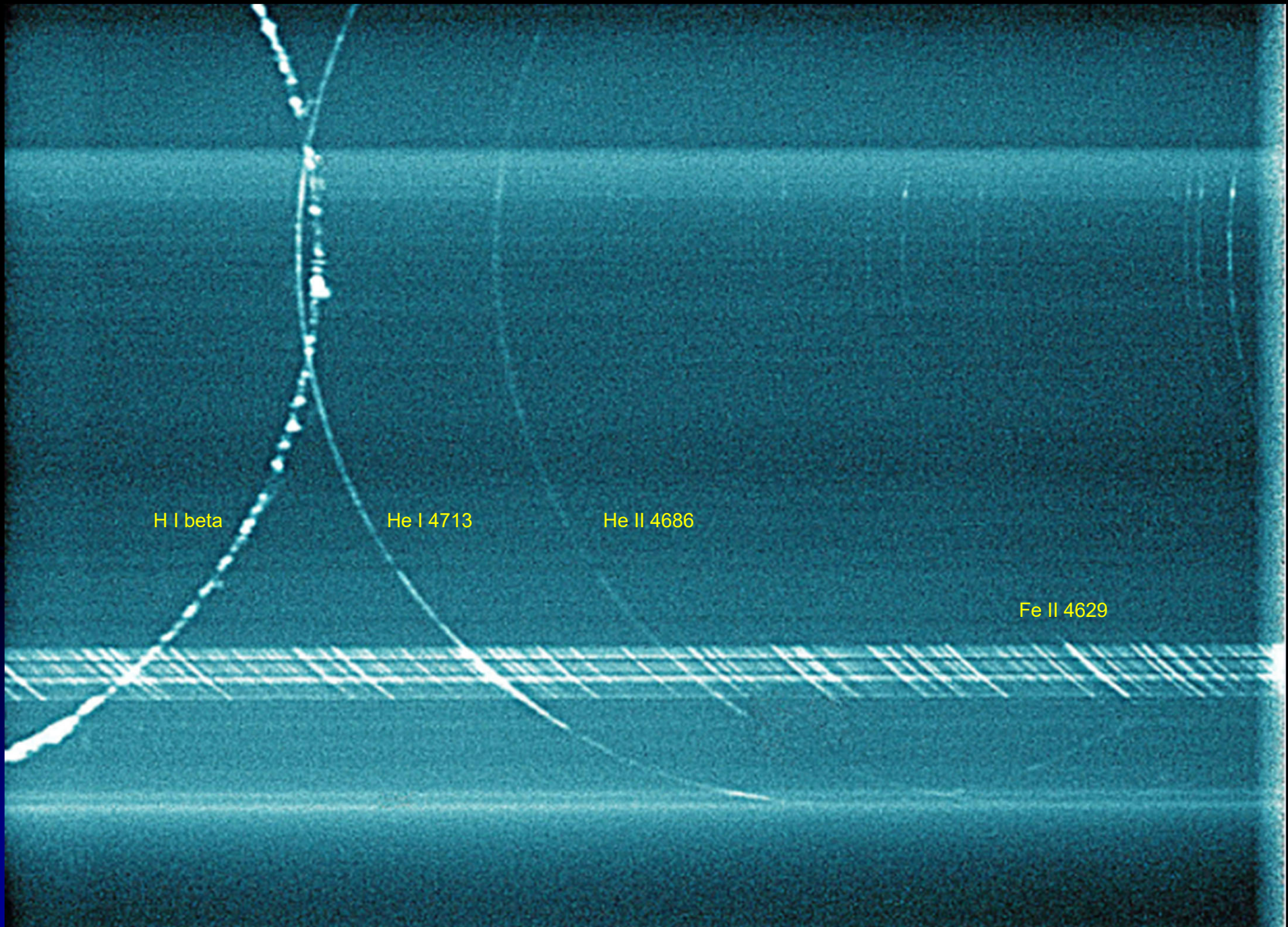


Ecart de 0,8 s par rapport à la précédente



Zoom sur les 6 spectres sommés N° 16202 à 16207  
Seuils de visualisation : 0 à 2280 adu





H I beta

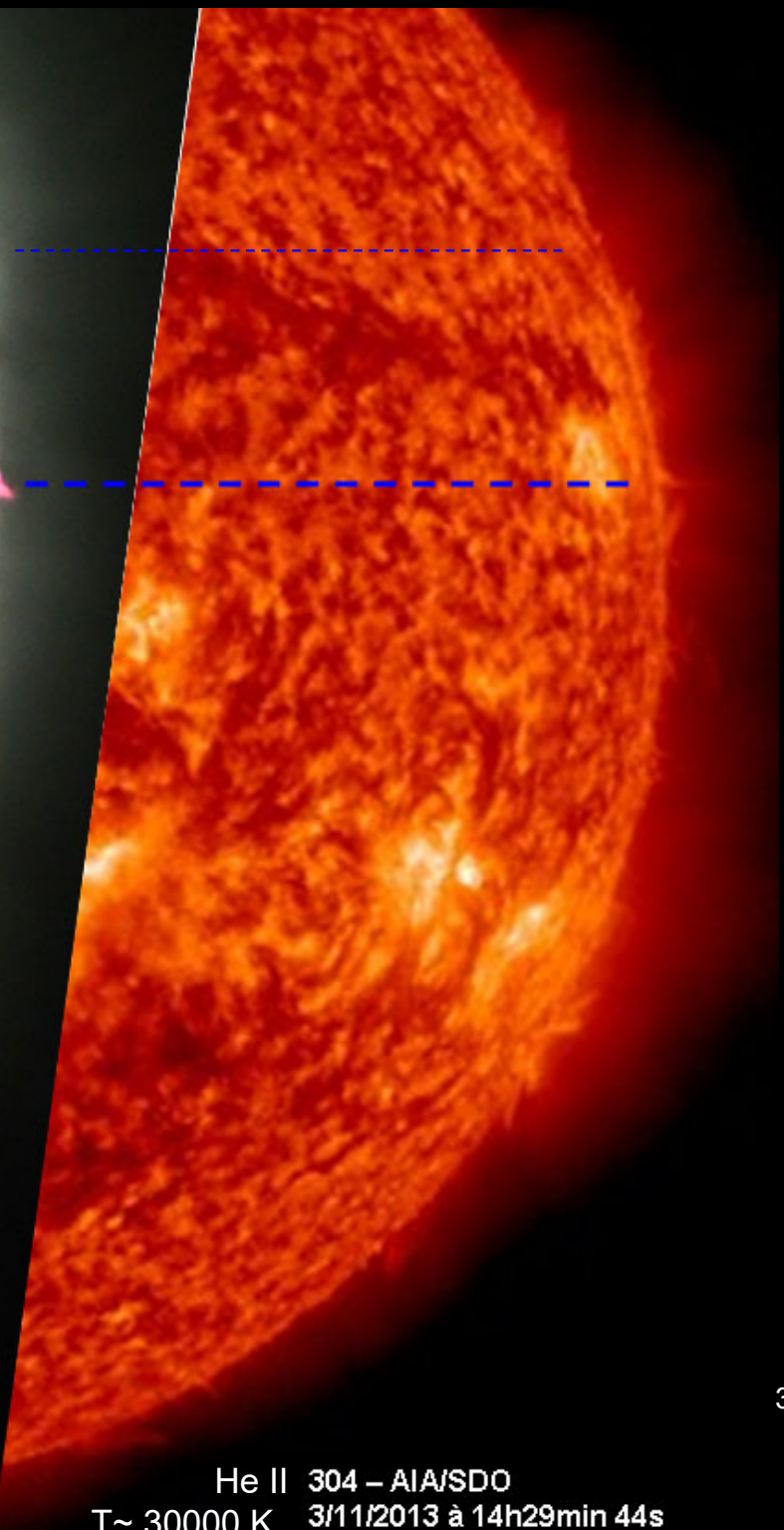
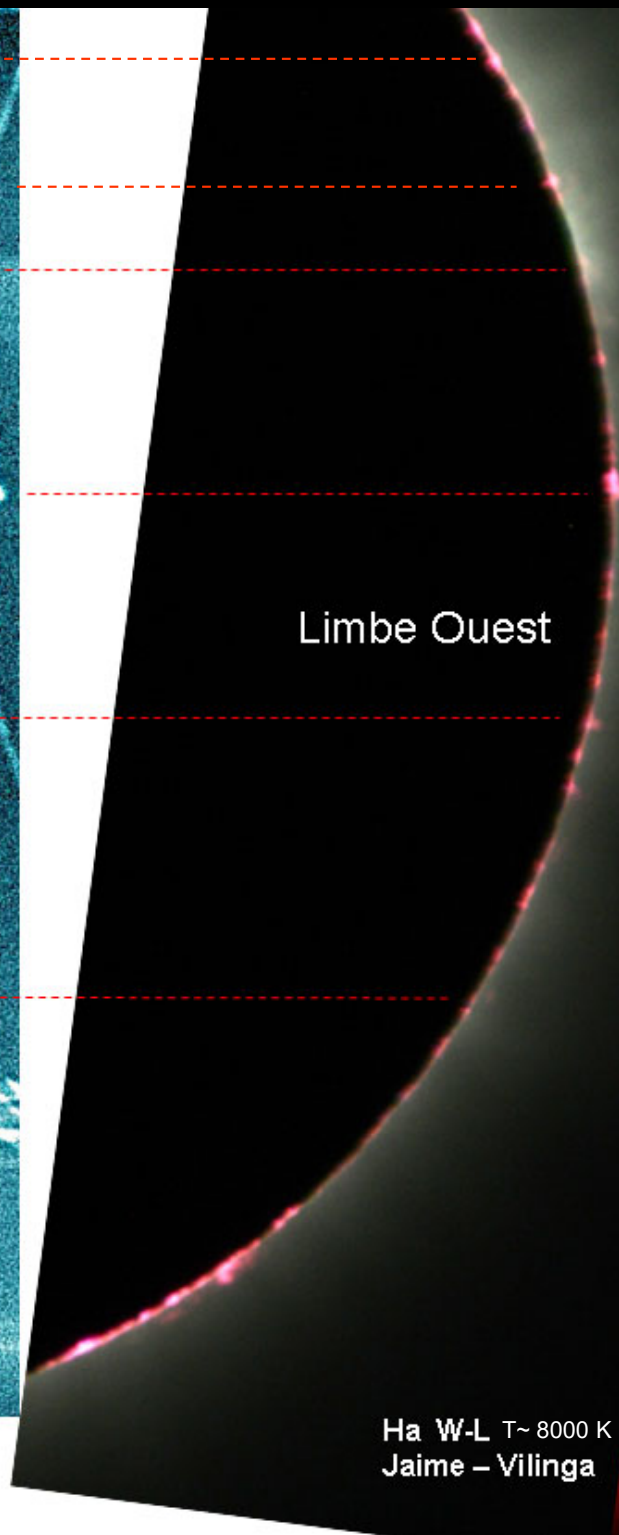
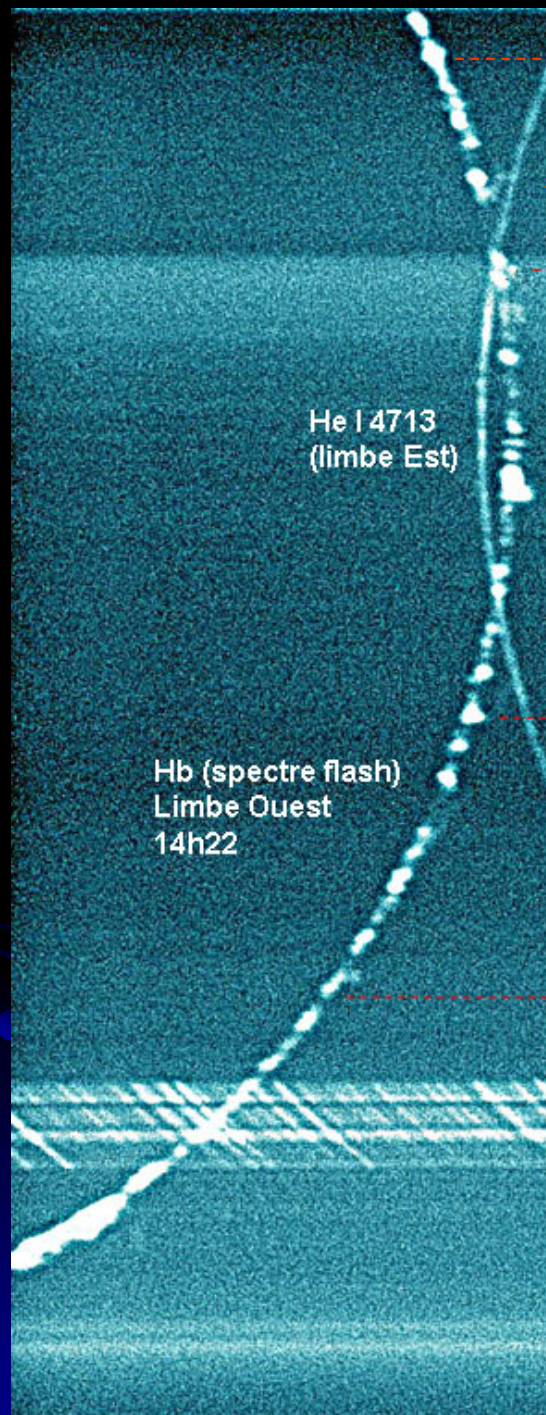
He I 4713

He II 4686

Fe II 4629

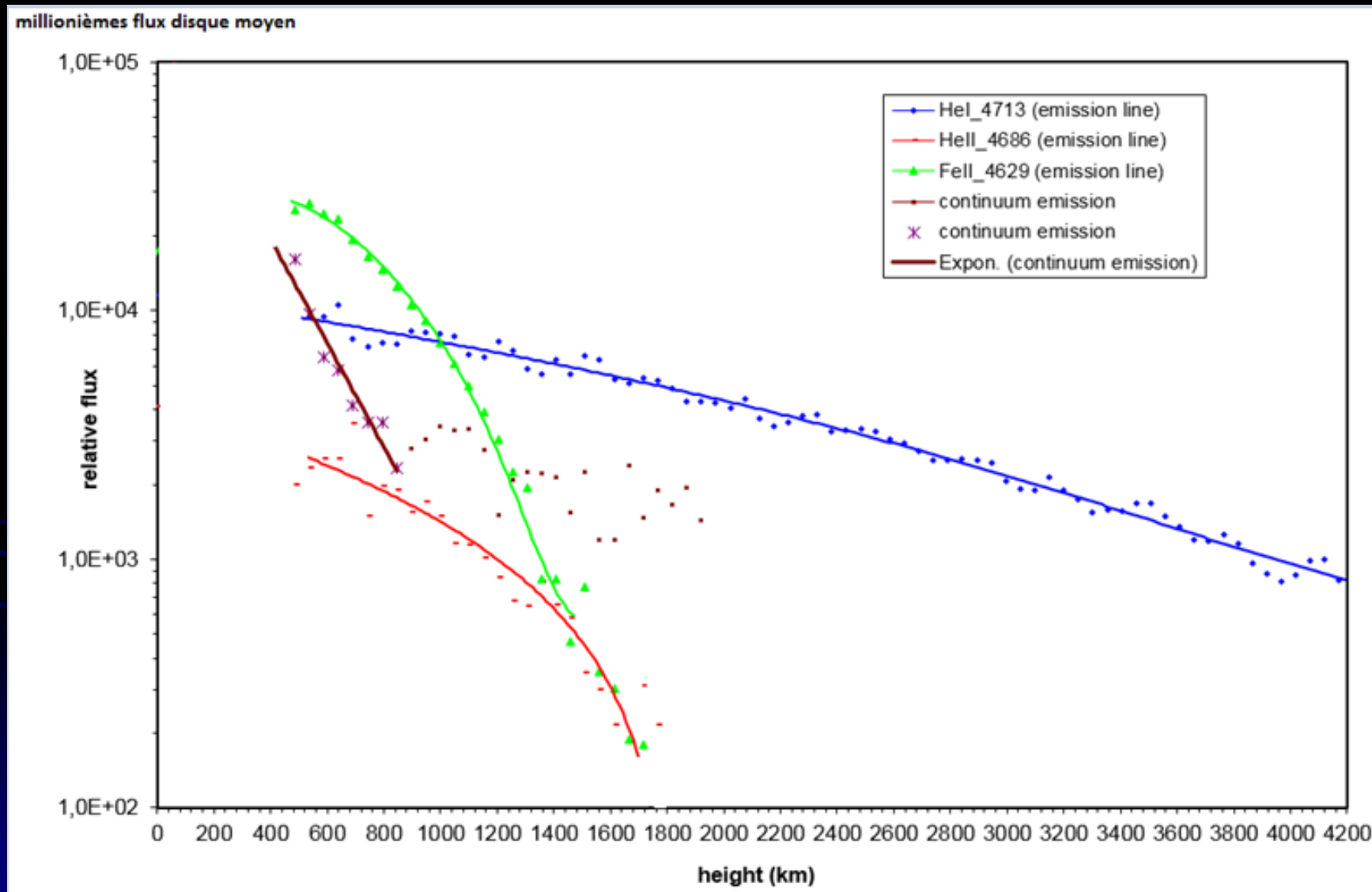
Somme N°16200 à N°16260







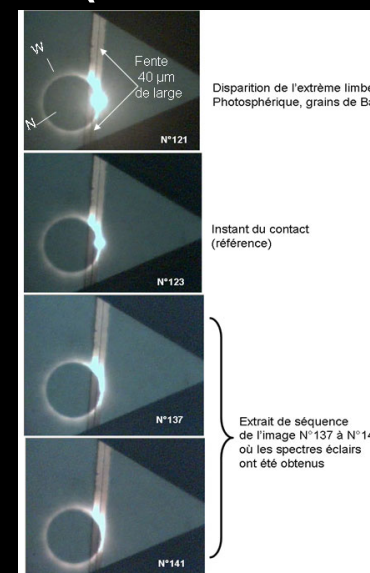
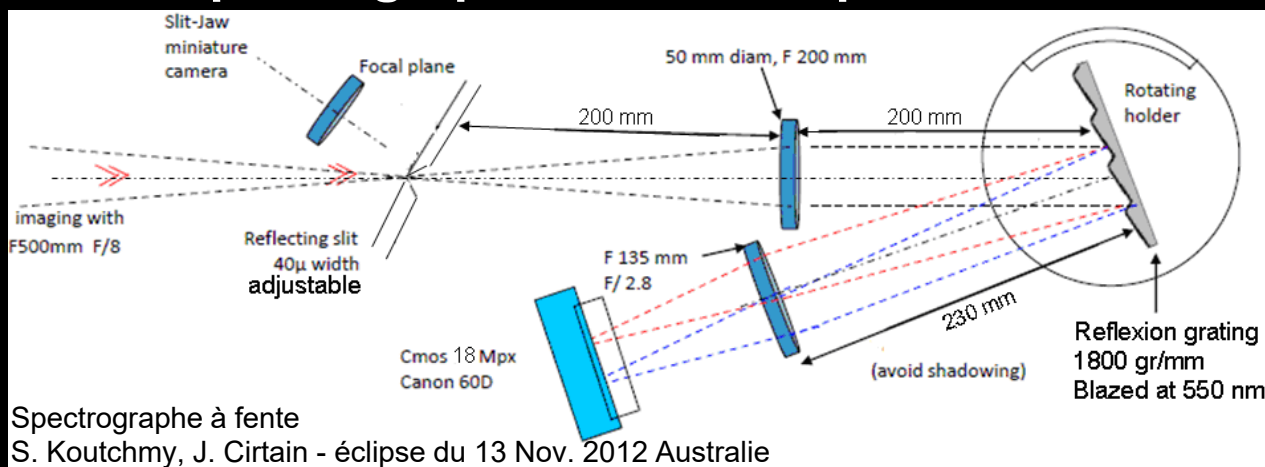
# Courbes de lumière $I = f(h)$ : relevés de flux dans les images des raies Second contact, éclipse 3/11/2013



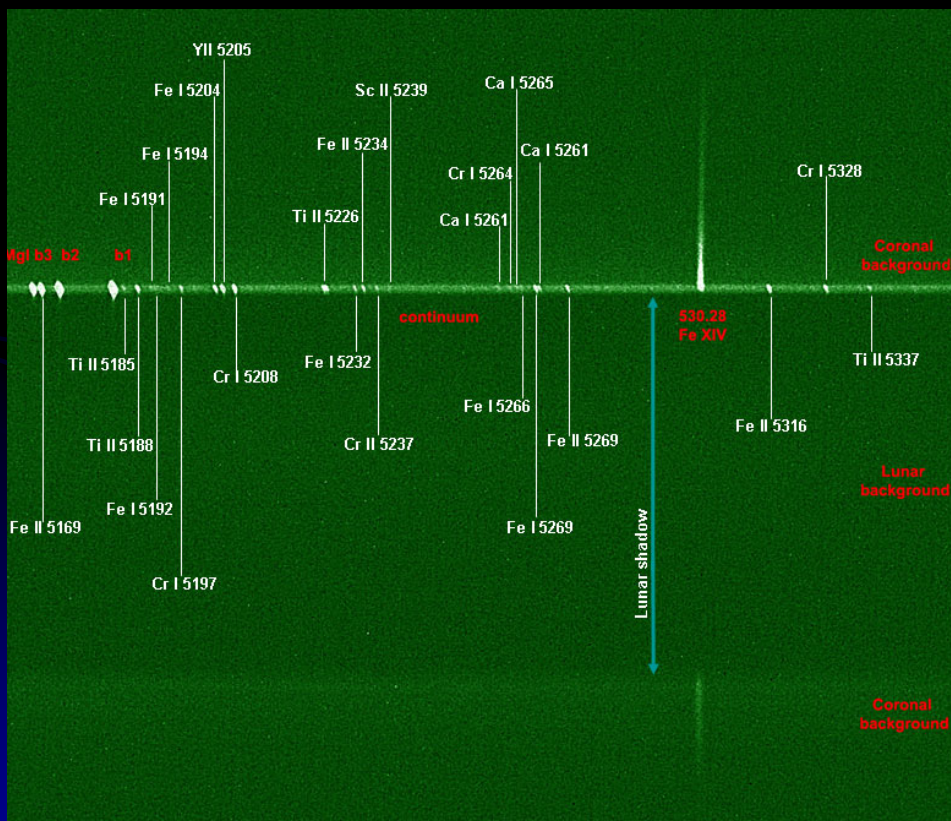
Analyse de gradients, écarts à l'équilibre thermodynamique

# Prolongement de l'analyse de l'interface Ph-C/I vers la couronne solaire

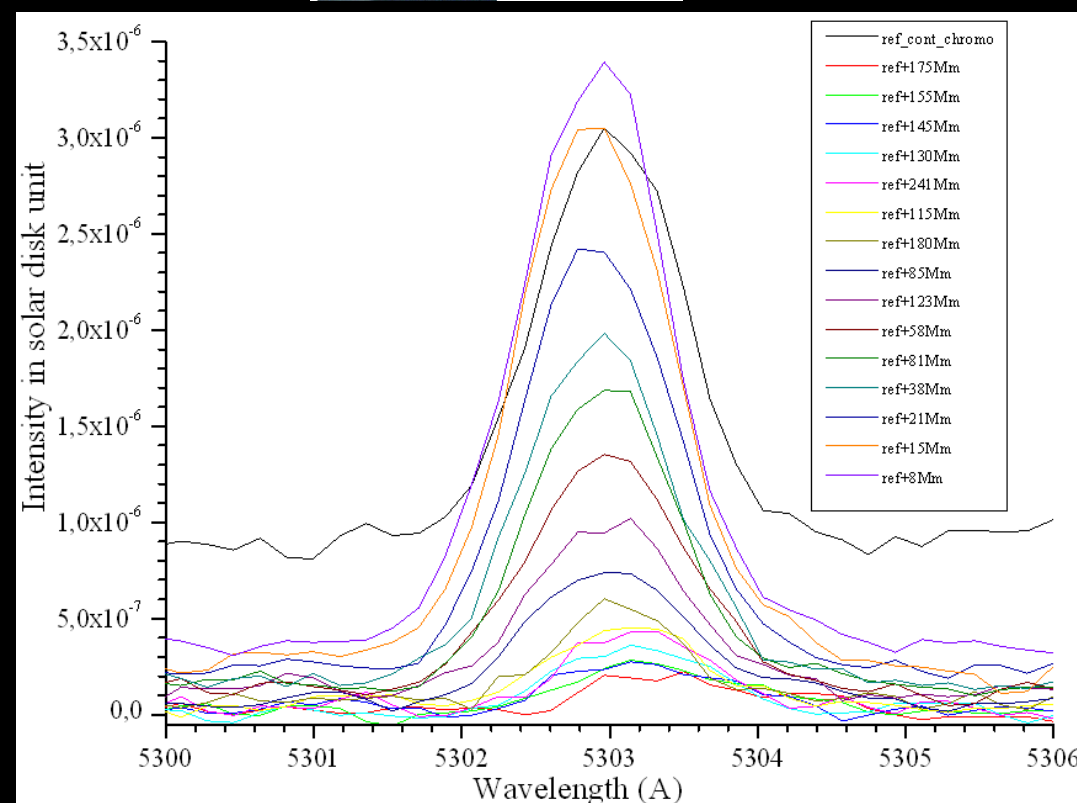
## Spectrographe à fente éclipse du 13 Nov. 2012 (fin du 2nd contact)



Images "slit-jaw" de la séquence du second contact, permettant de montrer la position de la fente sur le disque solaire occulté



Emission de la raie coronale du Fe XIV 5303 jusqu'à qq Mm (aussi bas que les "low FIP"). 4 spectres/s  
Effets d'intégration sur la ligne de visée difficiles à évaluer.  
Meilleure résolution en imagerie directe dans les raies EUV



Profils transversaux d'intensité dans la raie du Fe XIV 5303

# Projets d'observations pour l'éclipse du 12/08/2026

Compte-tenu de la hauteur de l'éclipse  $10,8^\circ$ /horizon au Nord-Ouest de l'Espagne  
difficulté de réaliser des images de structures dans les arcs des raies

Objectif : **obtenir des spectres éclairs dans la région de la bande G 430 +/- 5 nm**

- Etudier les raies de CH (même si certaines sont superposées aux raies atomiques)
- Comparer les épaisseurs et extensions des arcs Low-First Ionisation Potential avec les arcs de CH et H I gamma à 434 nm sur un même spectre – image
- Etude des séquences d'apparitions et disparitions des arcs/relief lunaire, renversement
- Caractériser la mésosphère dans les images de chaque arc fin des raies
- Etudier les interfaces photosphère-mésosphère/chromosphère, enveloppes de plasma

Matériel prévu :

Réseau de 1200 traits/mm par transmission dispersion spectrale évaluée à  $0,06 \text{ \AA} / \text{pixel}$  au 1<sup>er</sup> ordre

Filtre Bande G 430,3 nm largeur 2 nm Altaïr-Astro coulant 31,75 mm + densité neutre Baader 1,8 en 31,75

Utilisation d'une caméra CCD ZWO ASI 1600 MM refroidie (cadence ~ 5 images/s 4656x3520 pixels)

Lunette 50/600 mm achromatique Perl

Essais préparatoires sous ciel voilé 18 - 21 Août 2024 vers 19h15 locales en région Parisienne :

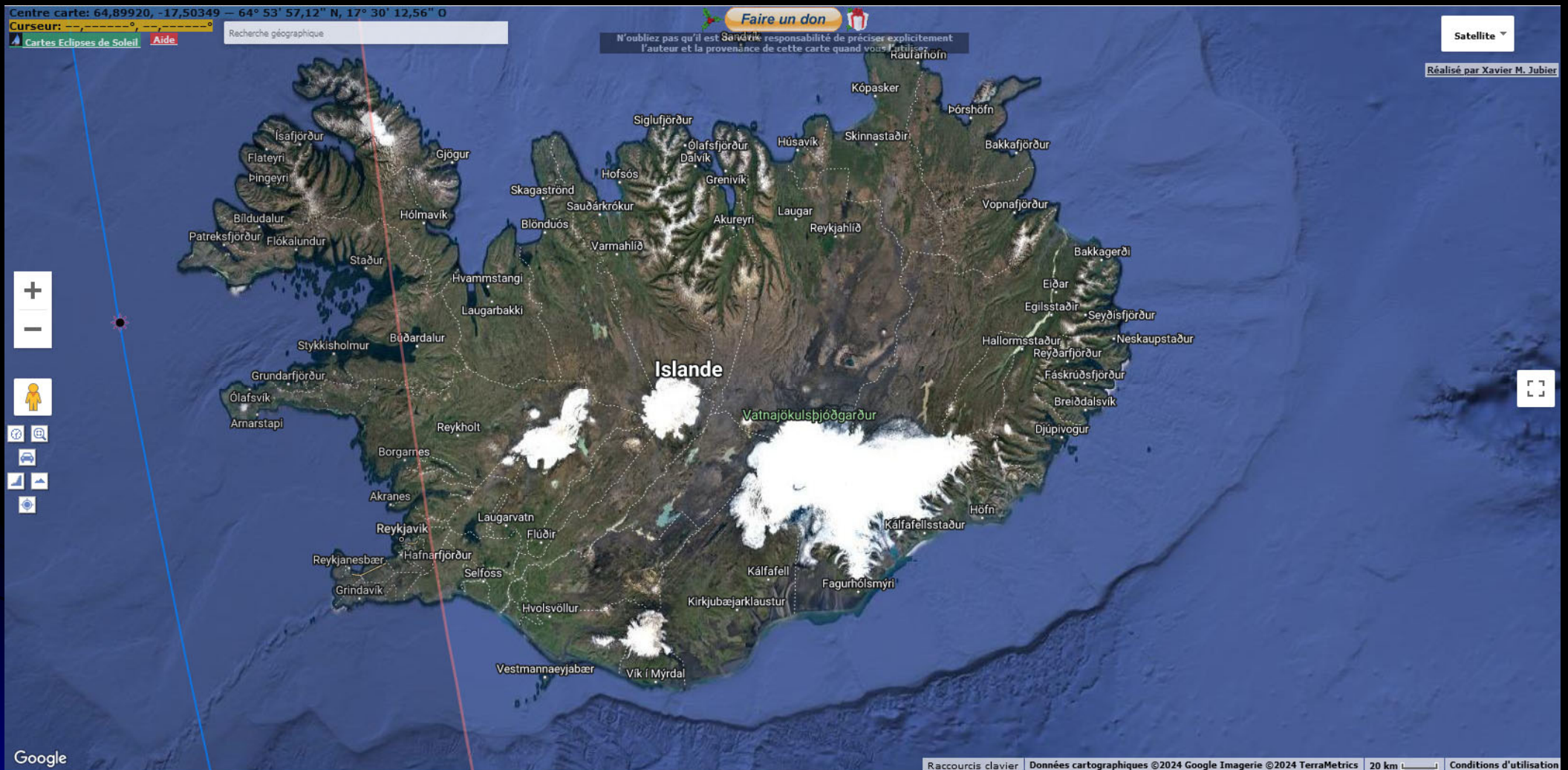
Ciel voilé épais sans ciel bleu, filtre 430 nm+ densité neutre 1,8 : Gain 1, pose 110 ms

Ciel moins voilé, léger ciel bleu, filtre 430 nm+ densité neutre 1,8 : Gain 1, pose 40 ms



Liens vers cartes :

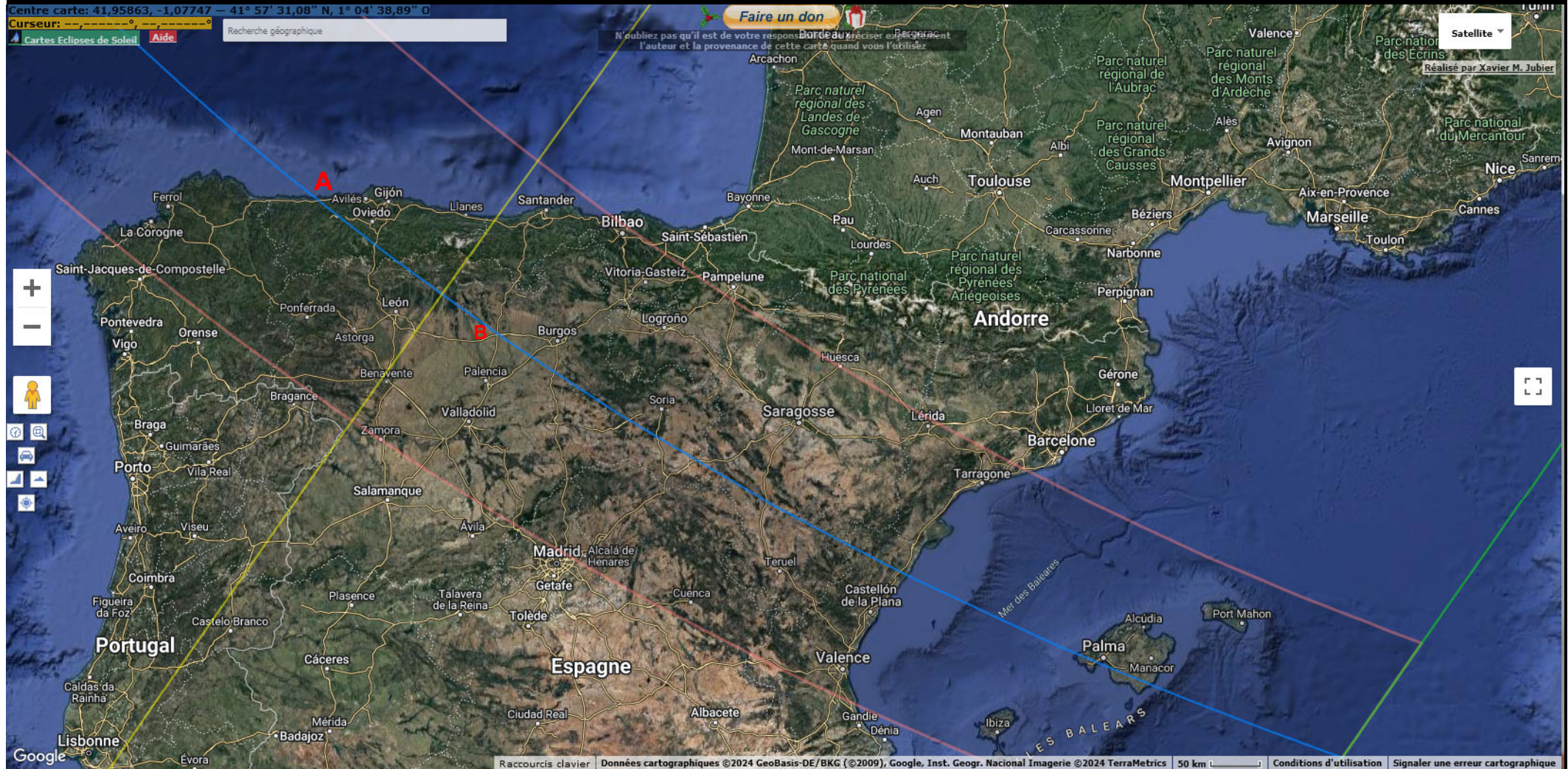
[http://xjubier.free.fr/site\\_pages/solar\\_eclipses/TSE\\_2026\\_GoogleMapFull.html](http://xjubier.free.fr/site_pages/solar_eclipses/TSE_2026_GoogleMapFull.html)



Hauteur du Soleil début éclipse à Ölafsvík : 25,3 °  
Durée totalité 2min 06s



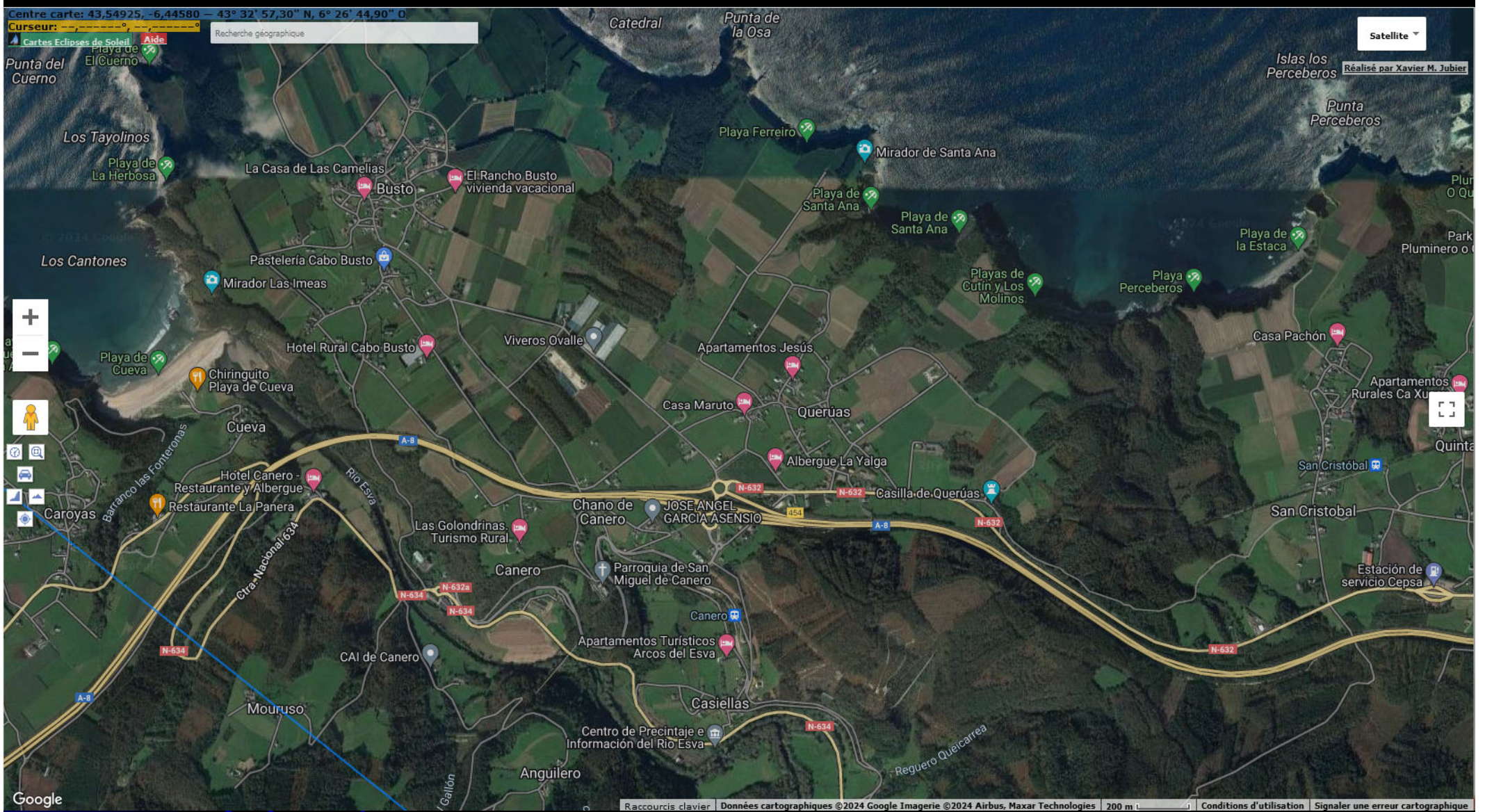
# En Espagne, plus près, plus simple d'accès, pour apporter un télescope conséquent et instrumentation associée, logistique



Hauteur du Soleil au début de l'éclipse à Luarca sur la ligne bleue de centralité:  $10,8^\circ$   
Au bord de mer, au Nord-Ouest, durée totalité 1min 49s

Point **A** : site prévu  
Point **B** : déplacement si nécessaire






Possibilités d'hébergements :  
 Nous serons à l'Albergue la Yalga à Queruas  
 proche du bord de mer

<https://alberguelayalga.com/>

Point A : site prévu

| 43° 32' 52,51" N <-> 43,54792°              | 1m 49,8s (éclipse totale de soleil)   | <a href="#">Aide</a>            |        |        |      |      |       |
|---|---|---------------------------------|--------|--------|------|------|-------|
| 6° 26' 34,19" O <-> -6,44283°               | 1m 49,6s (durée corrigée limbe)   |                                 |        |        |      |      |       |
| 89,0m (292ft)                               |  | Grandeur au maximum : 1,01668   |        |        |      |      |       |
| Pénétration dans l'ombre : 98,48% (150,2km) |   | Rapport Lune/Soleil : 1,03388   |        |        |      |      |       |
| 2,3km                                       |   | Vélocité de l'ombre : 2,079km/s |        |        |      |      |       |
| Largeur du tracé : 305,0km                  |   |                                 |        |        |      |      |       |
| Degré d'obscurité : 100,00%                 |   |                                 |        |        |      |      |       |
| Phase (ΔT=75,4s; alt.=89m)                  | Date  | Heure (TU)                      | Alt    | Azi    | P    | V    | CL    |
| Début de l'éclipse partielle (C1) :         | 12/08/2026  | 17:30:50,5                      | +20,9° | 270,8° | 299° | 03,6 |       |
| Début de l'éclipse totale (C2) :            | 12/08/2026  | 18:26:46,3                      | +10,8° | 280,2° | 118° | 09,7 | -1,1s |
| Maximum de l'éclipse (MAX) :                | 12/08/2026  | 18:27:41,3                      | +10,7° | 280,3° | 208° | 06,6 |       |
| Fin de l'éclipse totale (C3) :              | 12/08/2026  | 18:28:36,1                      | +10,5° | 280,5° | 299° | 03,6 | -1,3s |
| Fin de l'éclipse partielle (C4) :           | 12/08/2026  | 19:20:57,0                      | +01,3° | 289,3° | 117° | 09,6 |       |
| Coucher du soleil (SET) :                   | 12/08/2026  | 19:34                           | -00,8° | 291,4° |      |      |       |

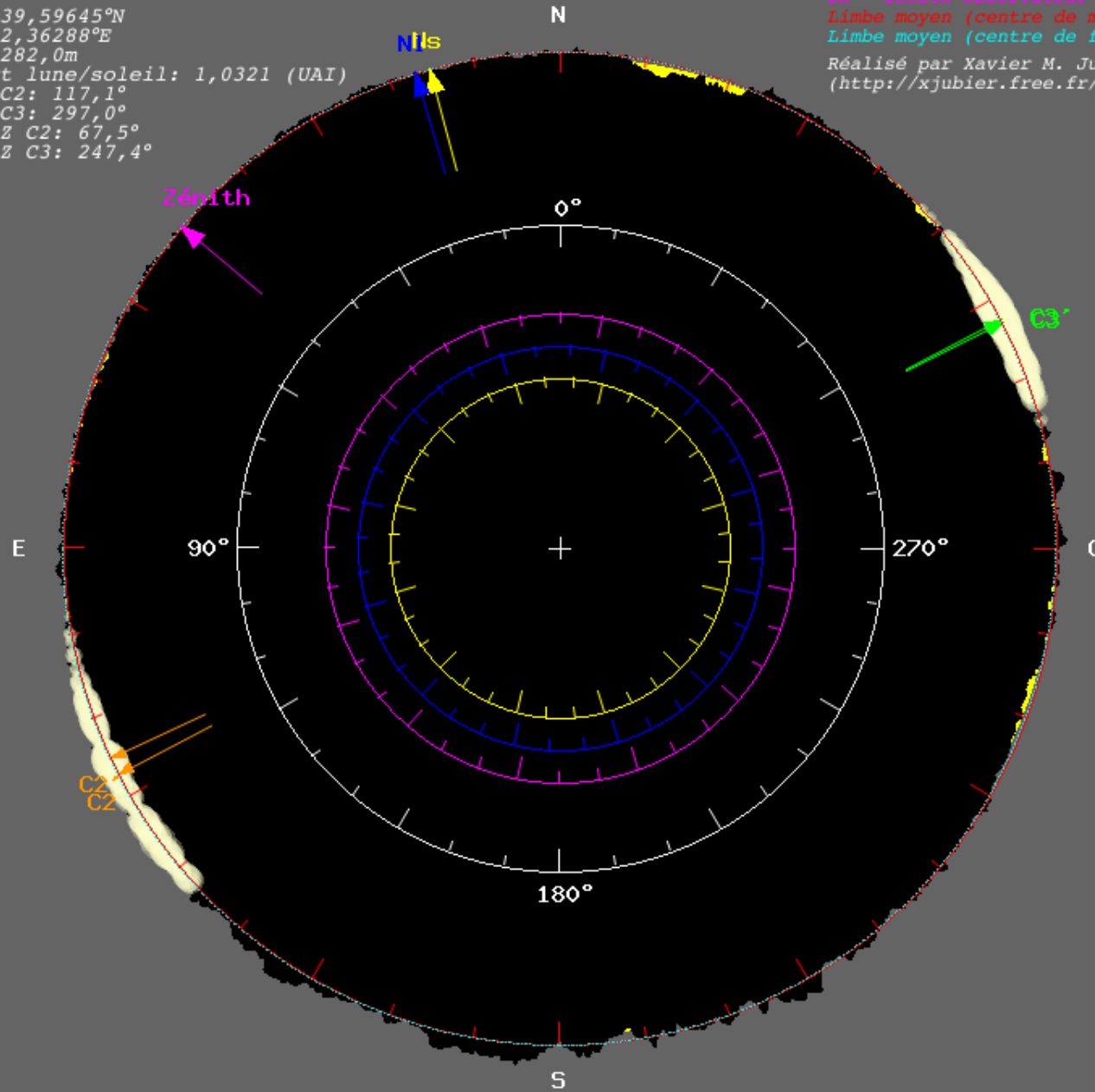


Libration topocentrique:  
l: +3,61°  
b: -0,22°  
c: 16,89°

Eclipse totale de soleil du 12/08/2026  
 $\Delta T$ : +74,50s  
Facteur d'exagération: x15

Ns = pôle nord du soleil (15.2°)  
Nl = pôle nord de la lune (16.9°)  
C2 = 2è contact  
C3 = 3è contact  
Zn = zénith observateur (49.6°)  
Limbe moyen (centre de masse)  
Limbe moyen (centre de figure)  
Réalisé par Xavier M. Jubier  
(<http://xjubier.free.fr/>)

Lat.: 39,59645°N  
Lon.: 2,36288°E  
Alt.: 282,0m  
Rapport lune/soleil: 1,0321 (UAI)  
Angle C2: 117,1°  
Angle C3: 297,0°  
Angle Z C2: 67,5°  
Angle Z C3: 247,4°



Contacts corrigés (Kaguya):  
C2': -1,1s (115,1°)  
C3': -1,2s (297,3°)

Durée moyenne: 1m36,6s  
Durée corrigée: 1m36,4s

Grains de Baily: ±3,0s

# Références bibliographiques

- <https://iris.lmsal.com/index.html> : Interface Region Imaging Spectrograph (UV)
- Menzel. D.H. and W.W. Campbell 1931 : a study of the solar chromosphere, Lick Observatory Publications, 17
- Mitchell S.A. 1935 : the spectrum of the chromosphere from photographs obtained at total solar eclipses. Publications of the Leander Mc Cormick Observatory, 5. 51
- Wildt, R. 1947 An interpretation of the heights of lines in the solar chromosphere ApJ, 105, 36
- Moore, C. Minnaert, M.G.J. Houtgast, J. 1966 : the solar spectrum 2935 to 8770 Å Second revision of Rowland's solar spectrum wavelengths, National Bureau of Standards, 61
- Dunn, R.B., Evans, J.W., Jefferies, J.T. et al 1968 : the chromospheric spectrum at the 1962 eclipse, ApJS, 15, 275
- Hirayama, T. Irie, M. 1984 Sol. Phys. 90, 291 line width observation of He II 4686
- NIST Atomic Database : <https://www.nist.gov>
- Kurucz Solar Atlas : <http://kurucz.harvard.edu>
- Voulgaris, A. Mouratidis, C. Pasachoff, J.M. et al Solar Physics 04-2022 297, Issue 4, id 49 DOI : 10.1007/s11207-022-01983-w : A diligent analysis of the flash and Coronal spectrum of the total solar eclipse of 20 March 2015
- Withbroe, G.L. An analysis of CH in the solar atmosphere 1967, ApJ, 147, 1117w
- Sanchez Almeida, J et al G-Band spectral synthesis in solar magnetic concentrations arXiv:astro-ph/0103006v1 Mar 2001
- Popa, S.A. et al 2023 A&A : Non local thermodynamic equilibrium analysis of the Methylidyne radical molecular lines in metal-poor stellar atmosphere

Merci pour votre attention