

Le projet Sol'Ex

Un autre regard sur le Soleil

Par christian Buil et Valérie Desnoux

Le projet Sol'Ex - The « Solar Explorer »

Un instrument d'observation multi longueurs d'onde de la surface du Soleil

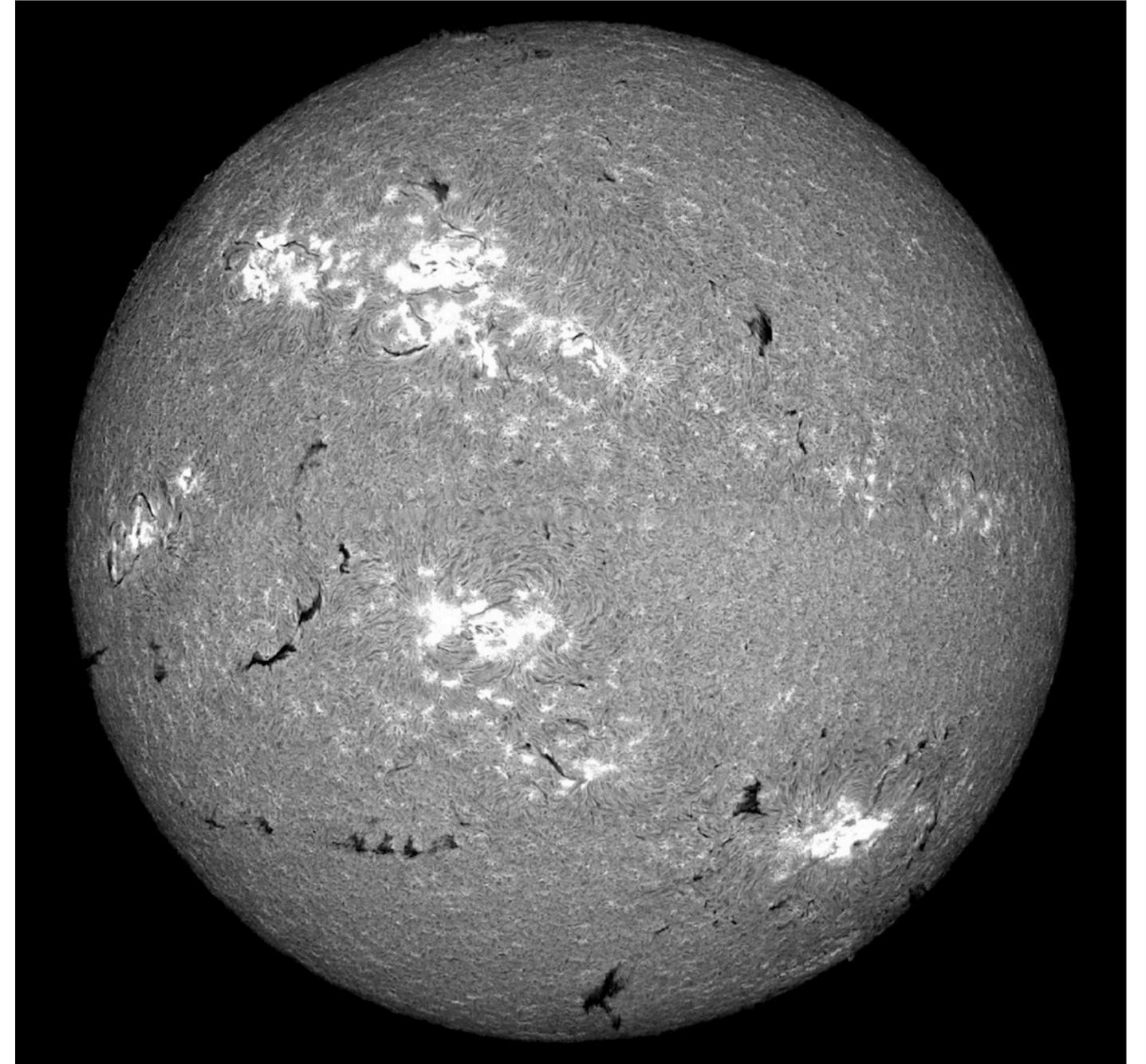
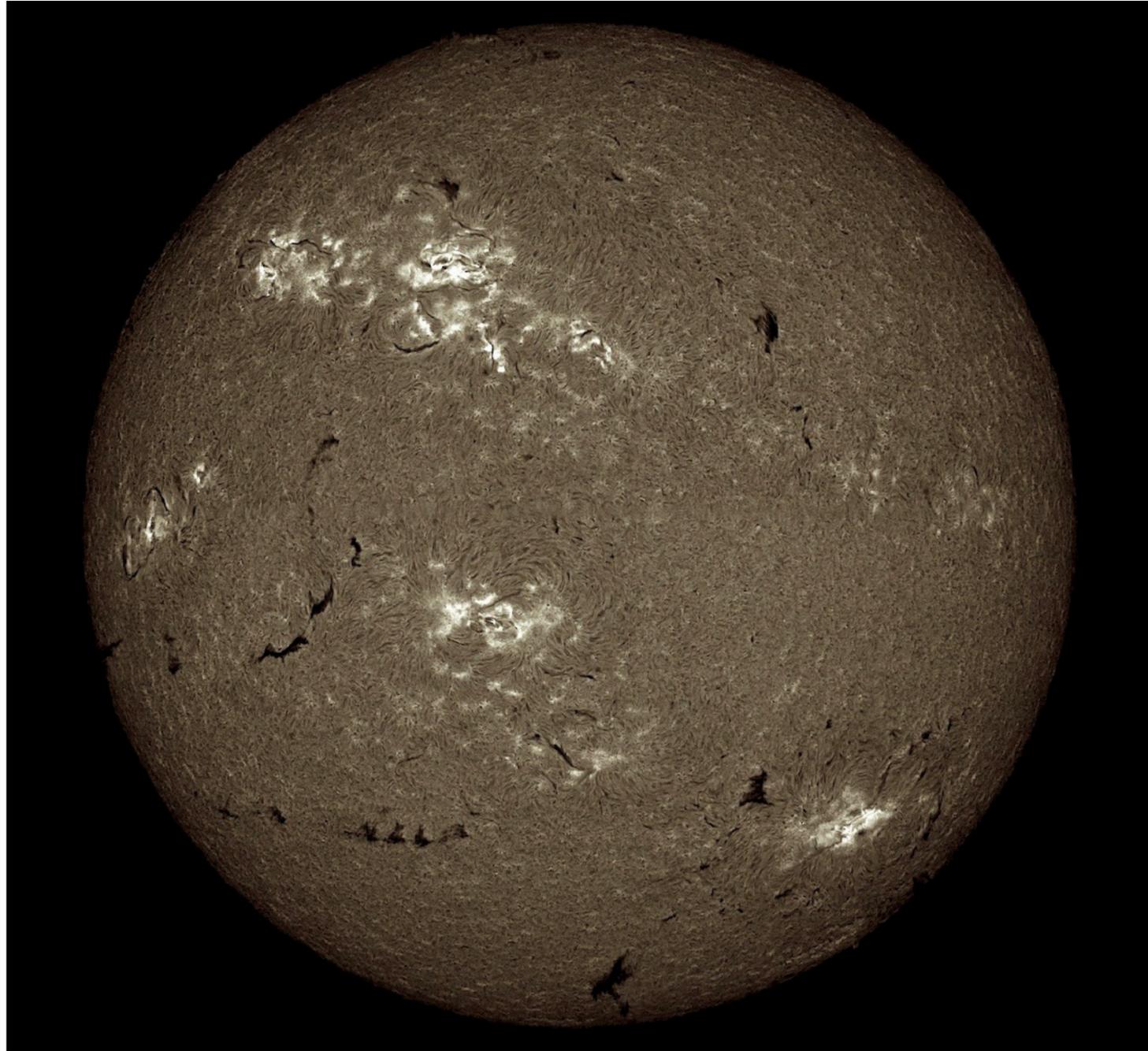
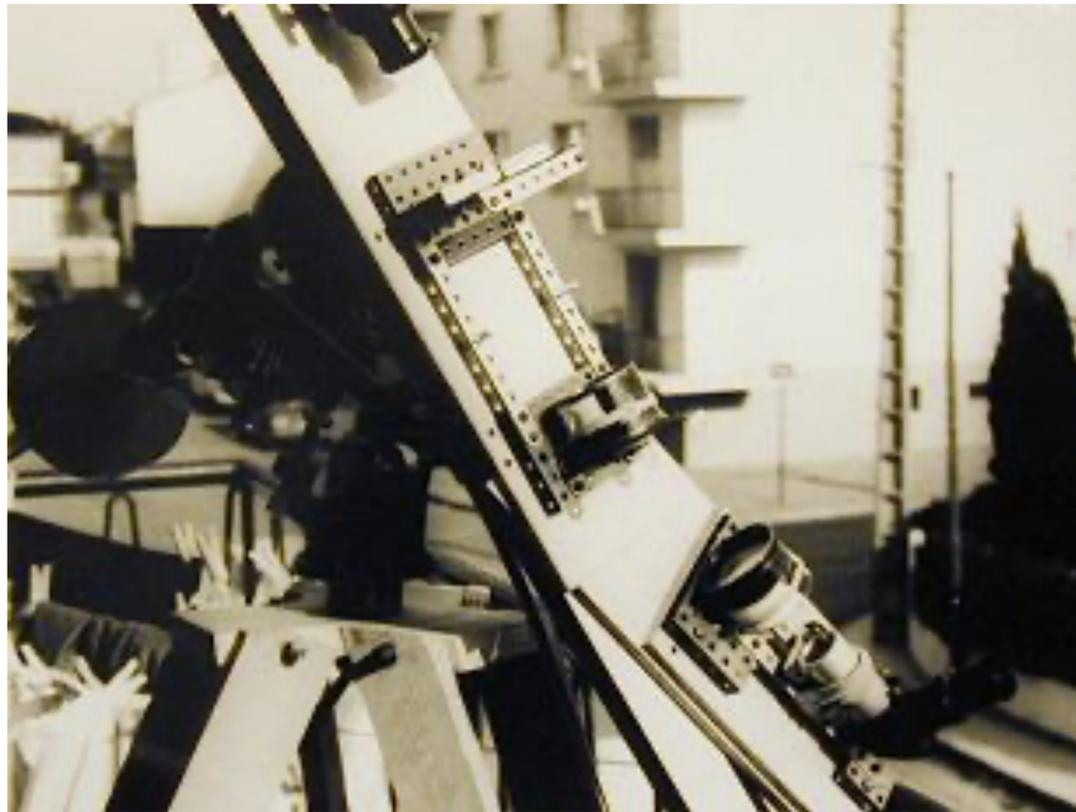


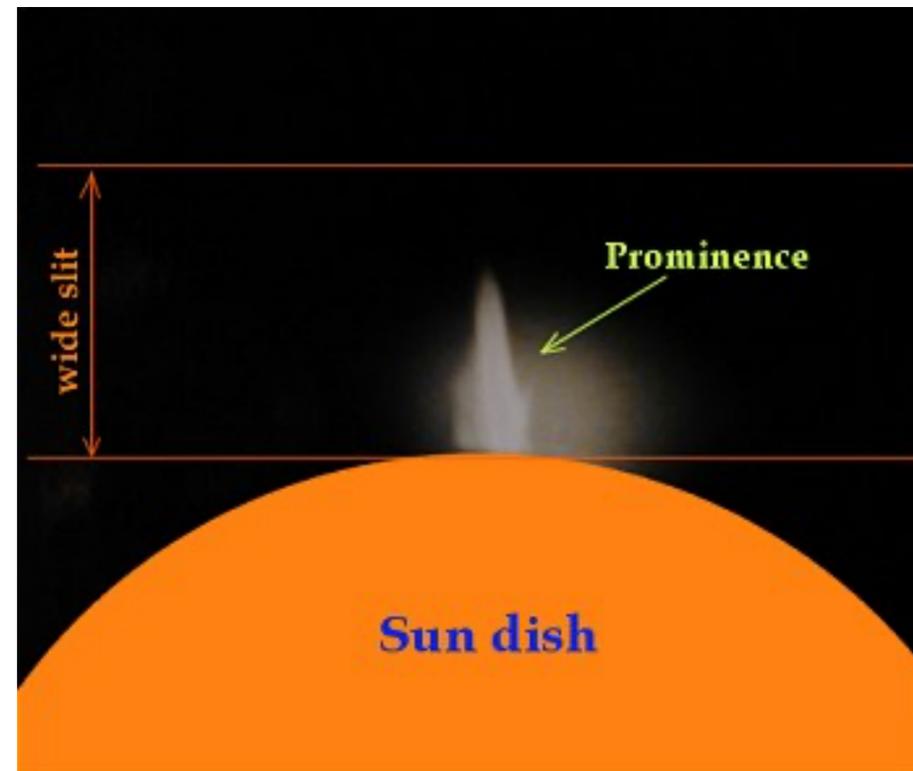
Image H-alpha - 18 mai 2020 - Sol'Ex sur une lunette Sky-Watcher 100ED

Un peu d'histoire : la génèse

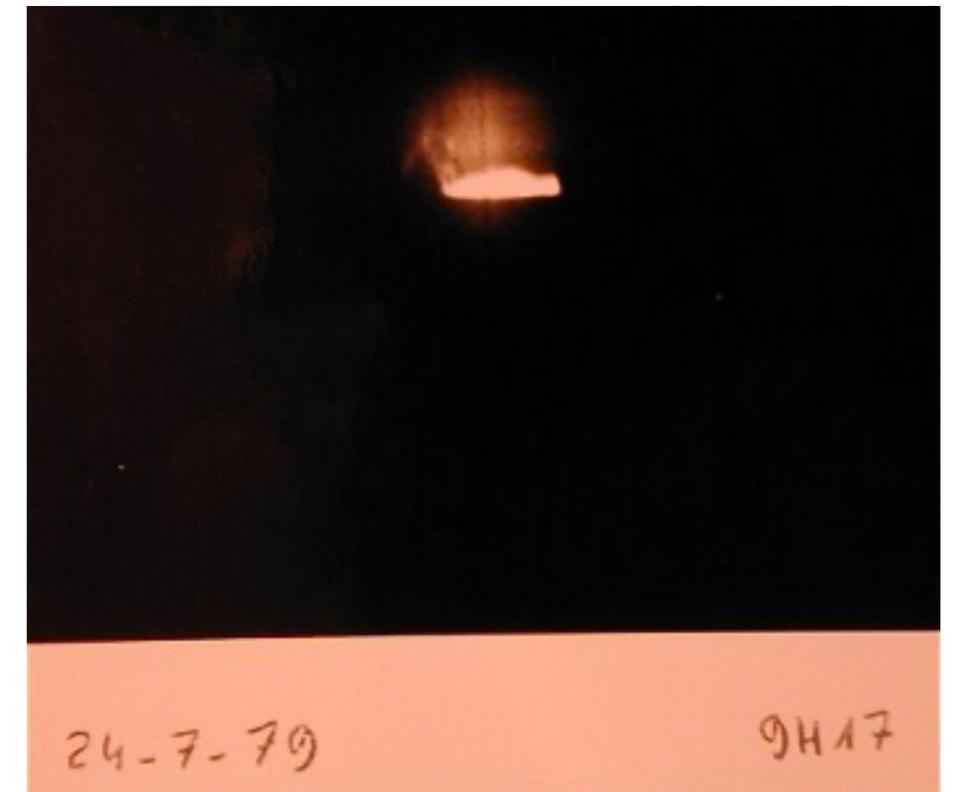
C'est la spectrographie qui nous a conduit   l'observation solaire...



L'un de mes premiers spectrographes (C. Buil, 1974)



Observation des protubérances au limbes solaire (fente spectro tangente) - Lunette PERL de 100 mm
Mon premier article dans la revue de la SAF (l'Astronomie en 1980)



The « Solar Explorer »

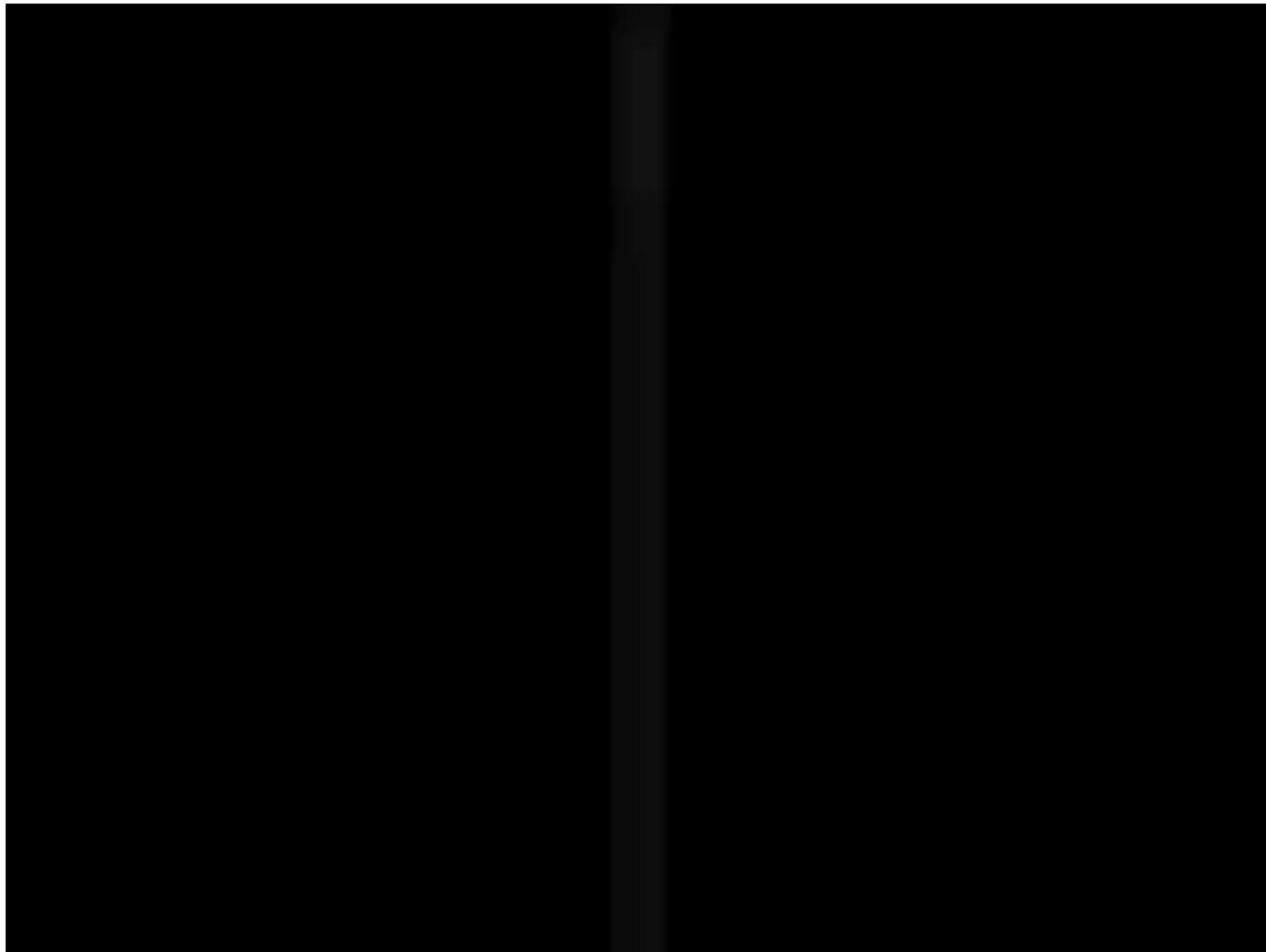
SOL'Ex

Motivation et philosophie du projet :

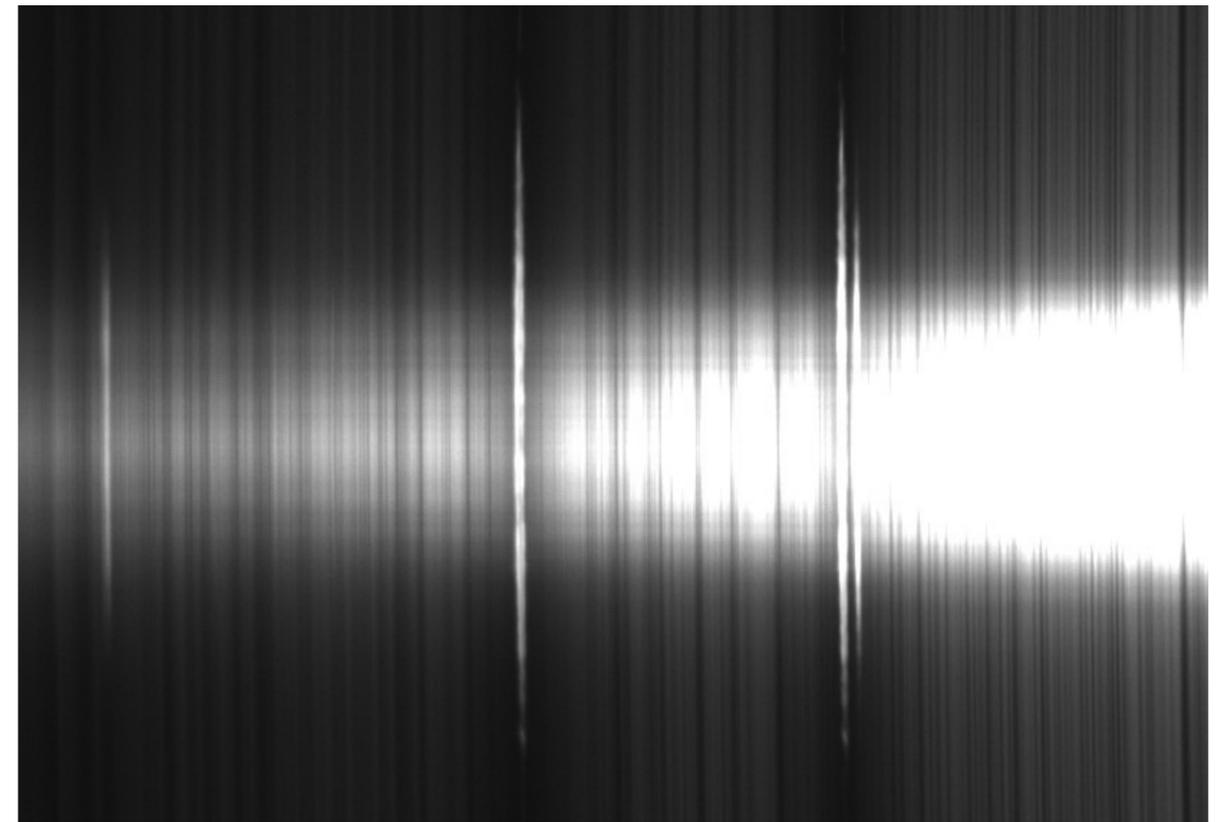
- Rendre accessible à la plupart des amateurs la technique de la spectrohéliographie
- Un instrument facile à construire soi-même pour abaisser le coût
- Une expérience pédagogique
- Un prix minimal en adoptant des solutions techniques innovantes, simple et en visant une large diffusion (impression 3D, fourniture d'un kit optique)
- Offrir de bonnes performances (résolution typique de 0,2 Å) tout en permettant une utilisation sur des lunettes/télescopes de petites dimensions (50 à 120 mm de diamètre typique)
- Une grande flexibilité d'usage et évolution en spectrographe stellaire (Star'Ex...)

Sol'Ex est un spectrohéliographe - Le principe

Balayage du disque sur la fente d'entrée de Sol'Ex et capture à haute cadence des image du spectre (100 à 300 trames/s.).
Durée d'acquisition avec une caméra moderne : 10 to 30 sec. typ.



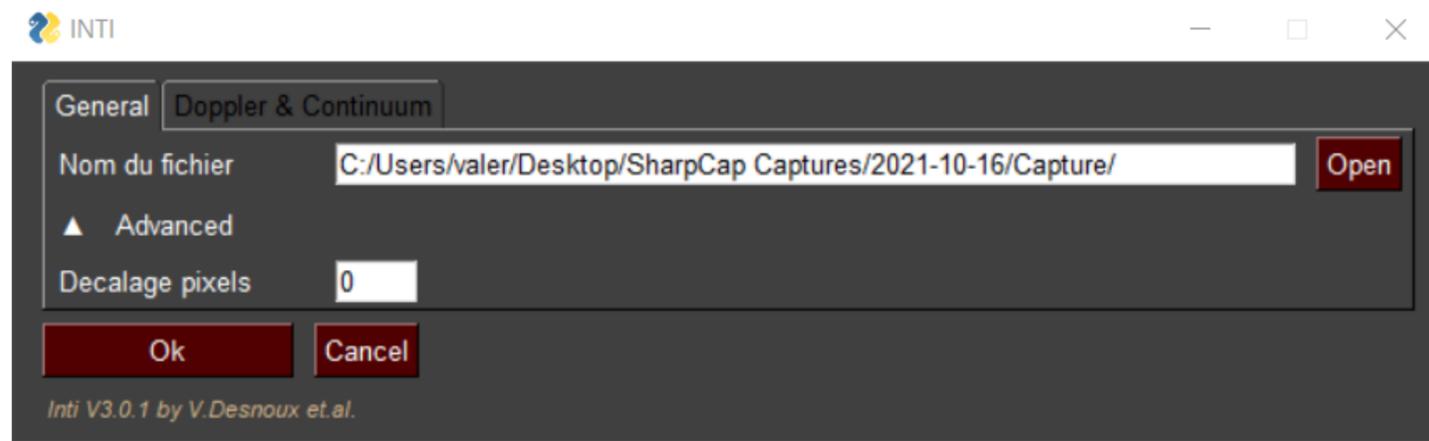
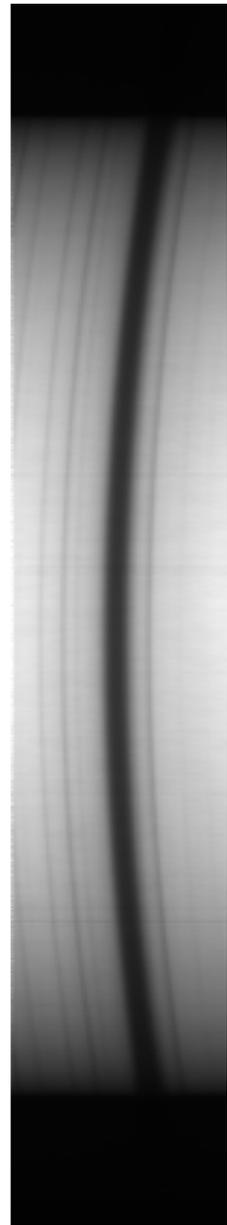
Il faut sélectionner une raies chromosphérique en « émission »



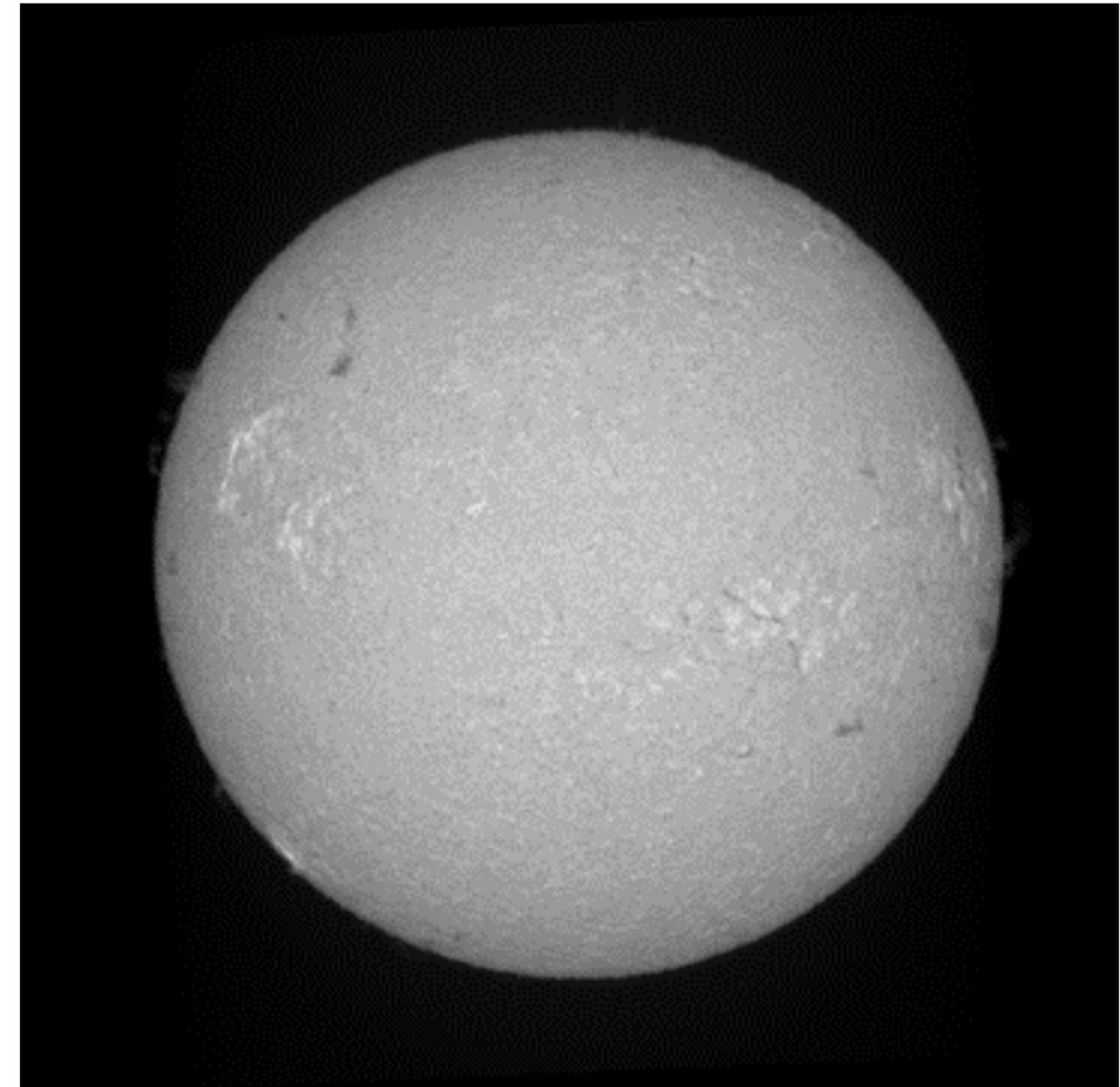
Aspect des raies Ca II H&K au limbe : phénomène d'inversion

**Les images du disque sont reconstruites
avec un logiciel dédié : INTI**

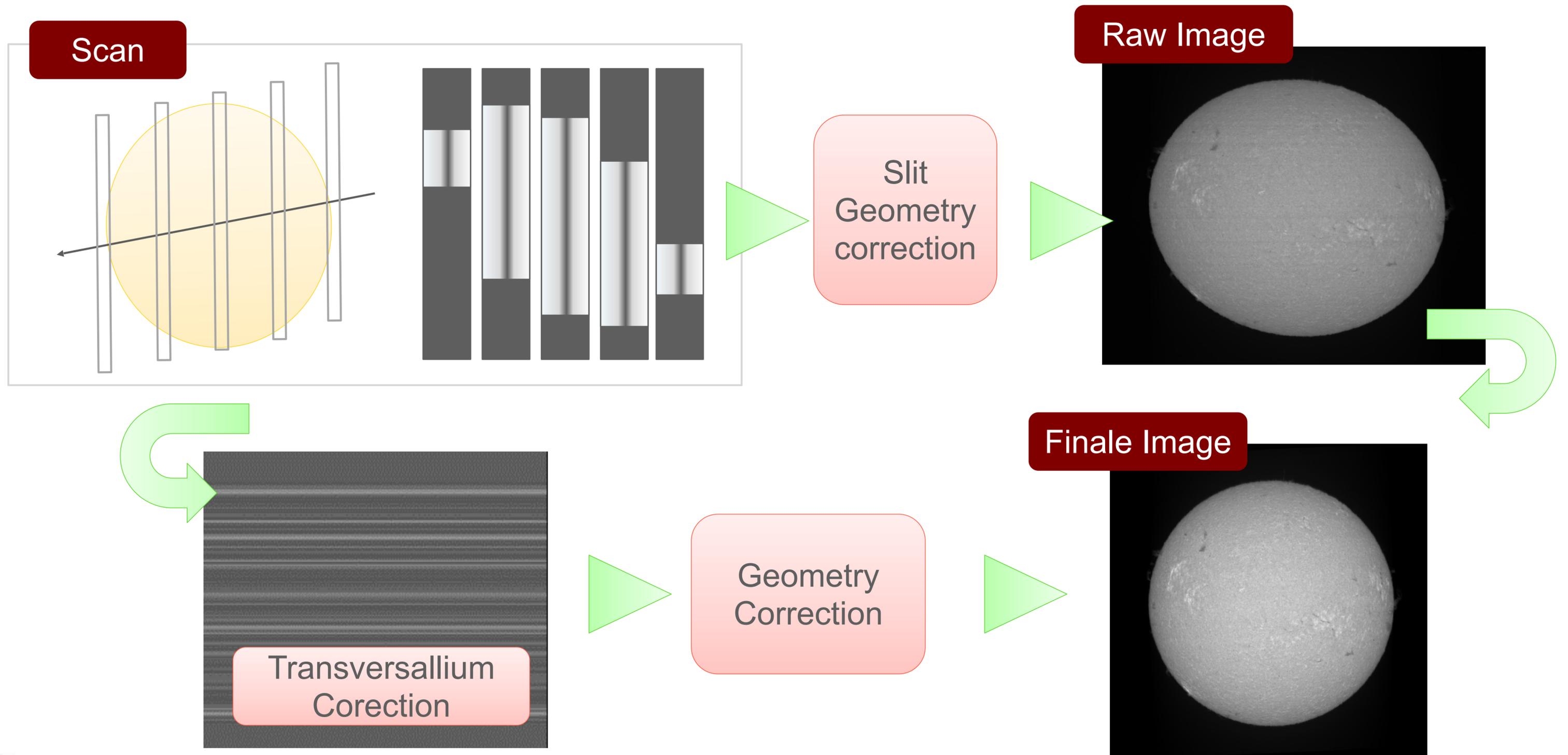
Traitement des balayages solaires (scans) avec INTI : une application Python OpenSource (V. Desnoux & all)



<http://valerie.desnoux.free.fr/inti/>

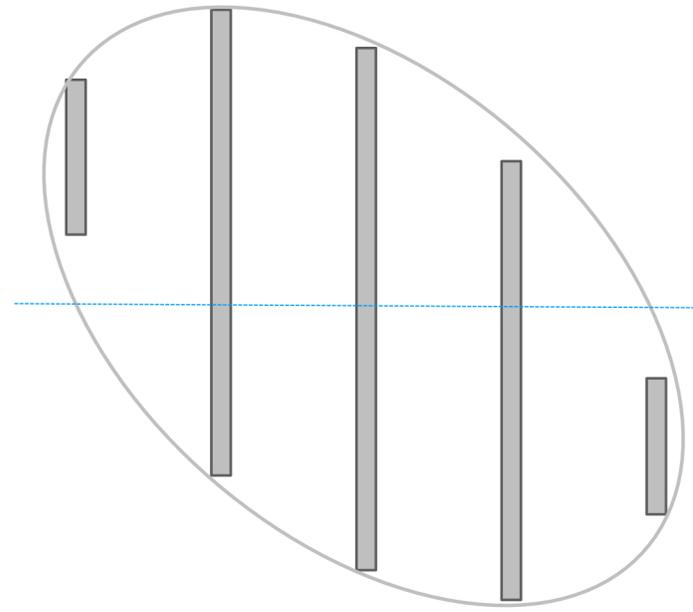


Le travail du logiciel INTI : extraction de l'information image et corrections géométriques

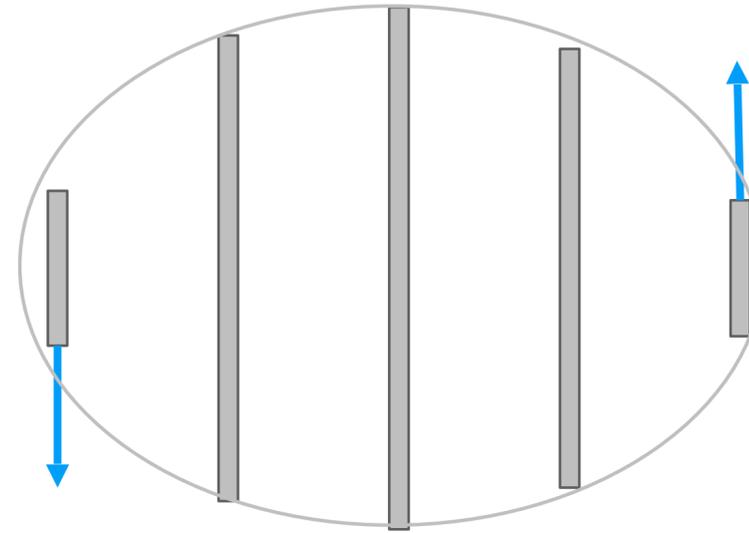


Le travail du logiciel INTI : traitement en un click - une Pierre Angulaire du projet Sol'Ex

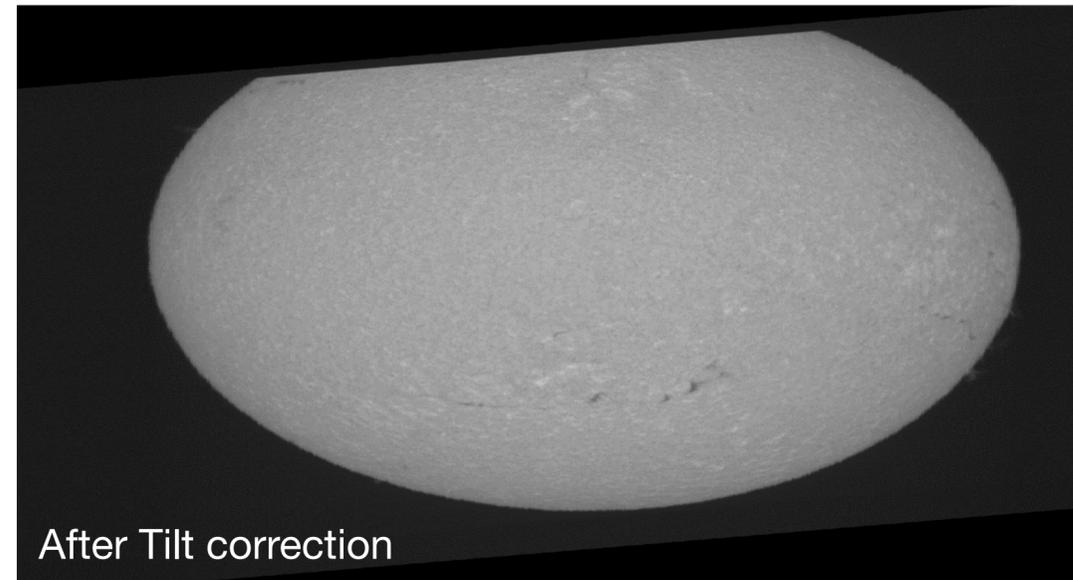
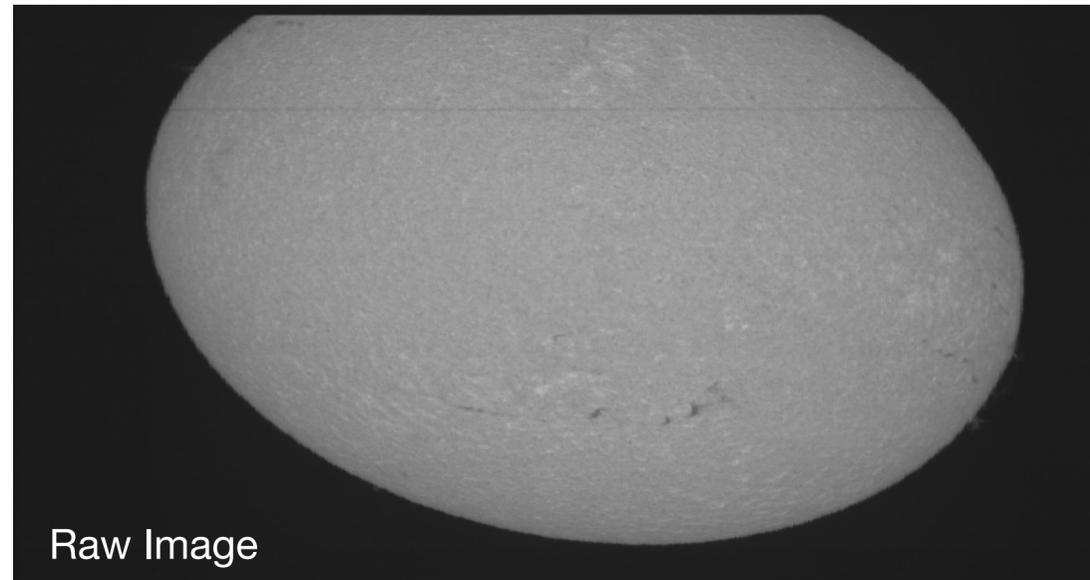
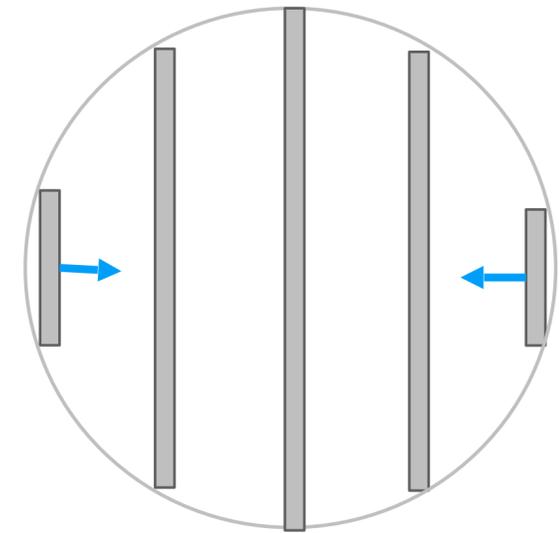
Raw



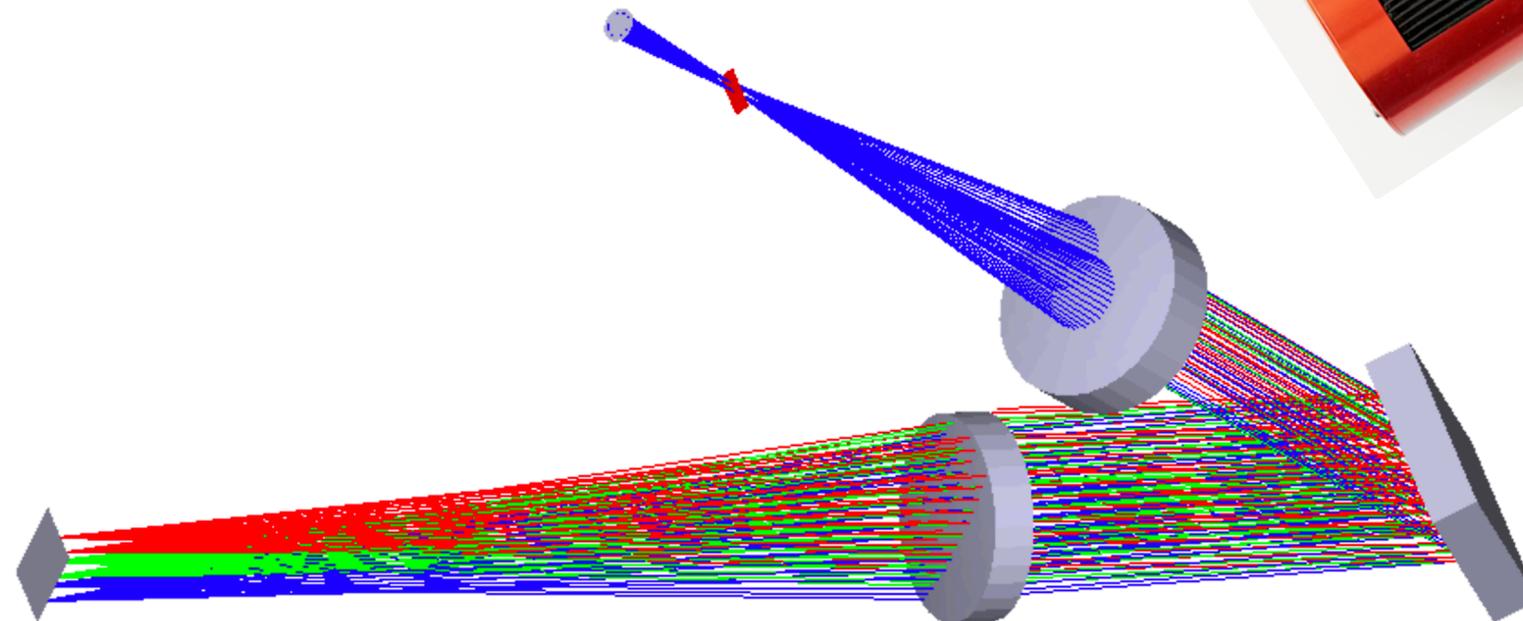
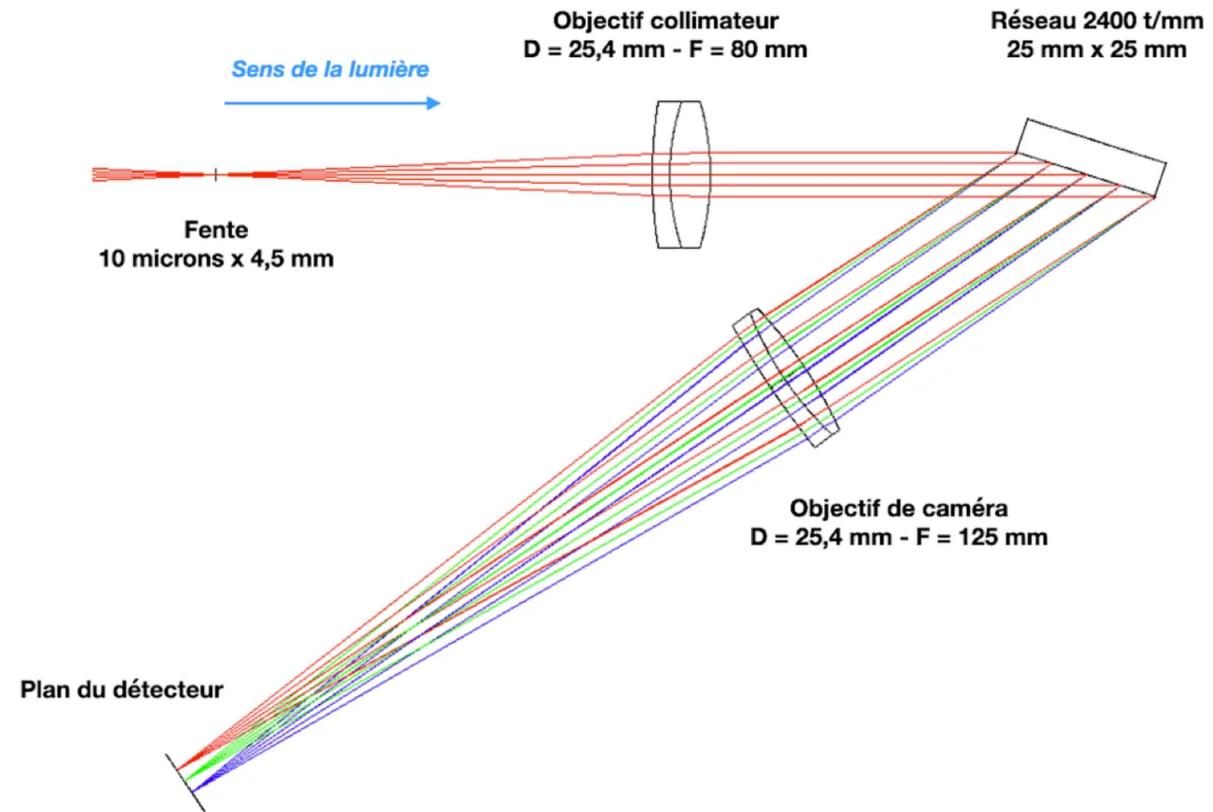
Tilt correction



Scaling



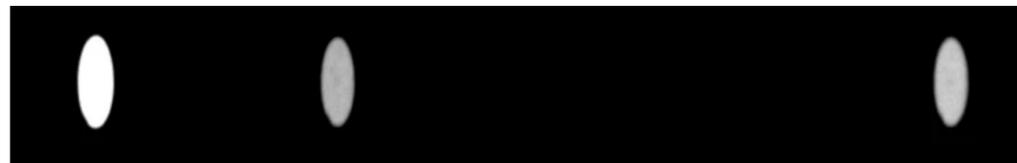
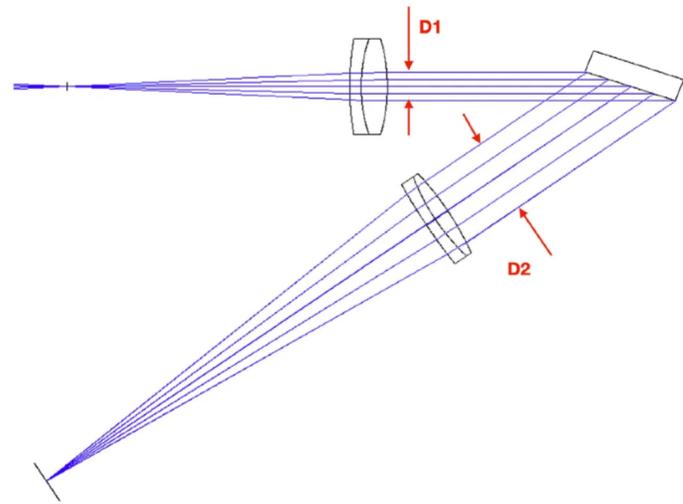
Le schéma optique : une forme un peu tordue, mais logique !



Le schéma optique : dans le détail

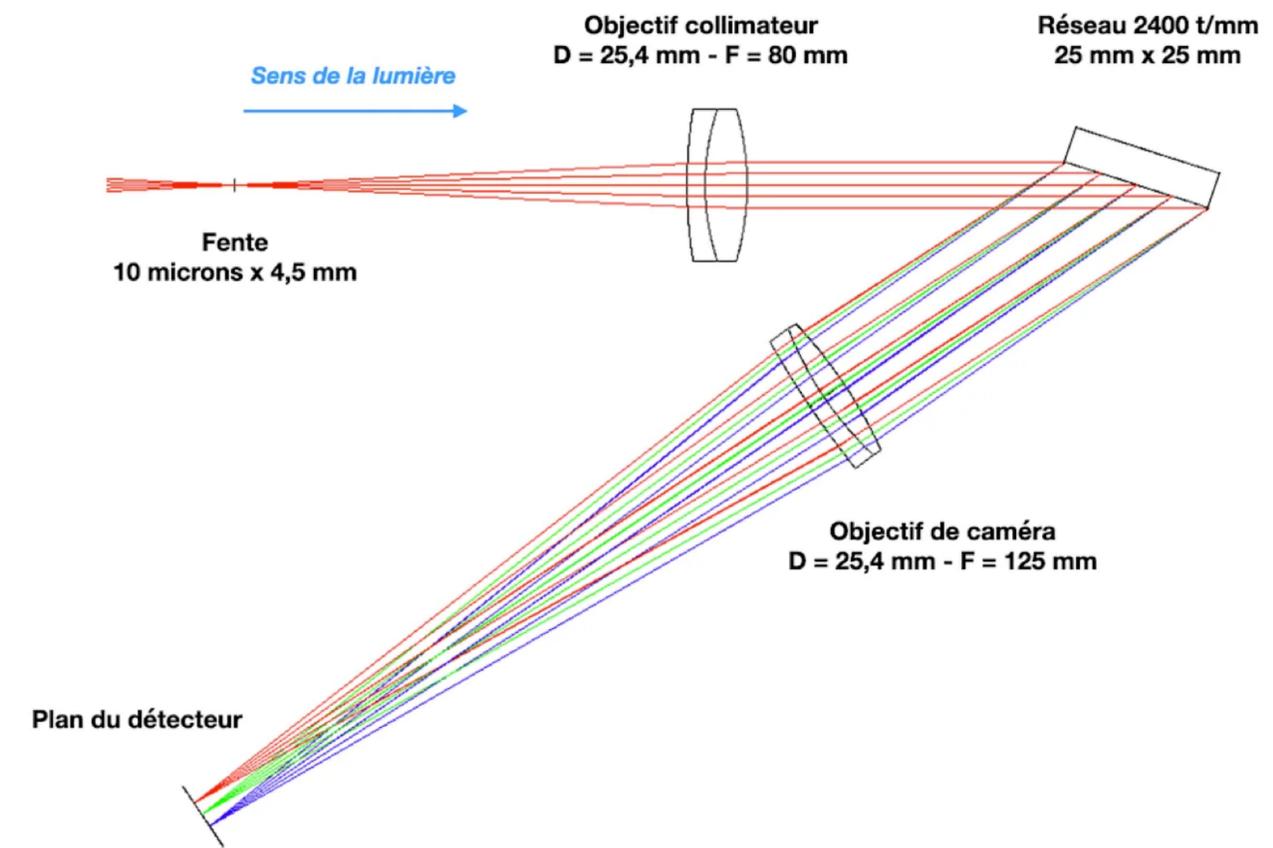
Une configuration optique très classique, mais :

- Ajustement fin des paramètres relativement à la petite taille des pixels des caméras CMOS populaires (ASI178MM, ASI290MM, ...) + valorisation haute-cadence de lecture (250 fps typ.)
- Utilisation d'un réseau holographique à haute dispersion spectrale (2400 traits par millimètre)
- Objectifs spécialement conçus pour le projet (chromatisme réduit par l'emploi d'un verre spécial)
- Exploitation d'une fente très régulière sur un support en verre (10 microns de large)
- Exploitation du principe de l'anamorphose pour accroître la résolution spectrale :



$D1 / D2 = 0.383$ au niveau de H-alpha -> facteur d'anamorphose -> réduction de la largeur de l'image de la fente sur le détecteur -> augmentation du pouvoir de résolution

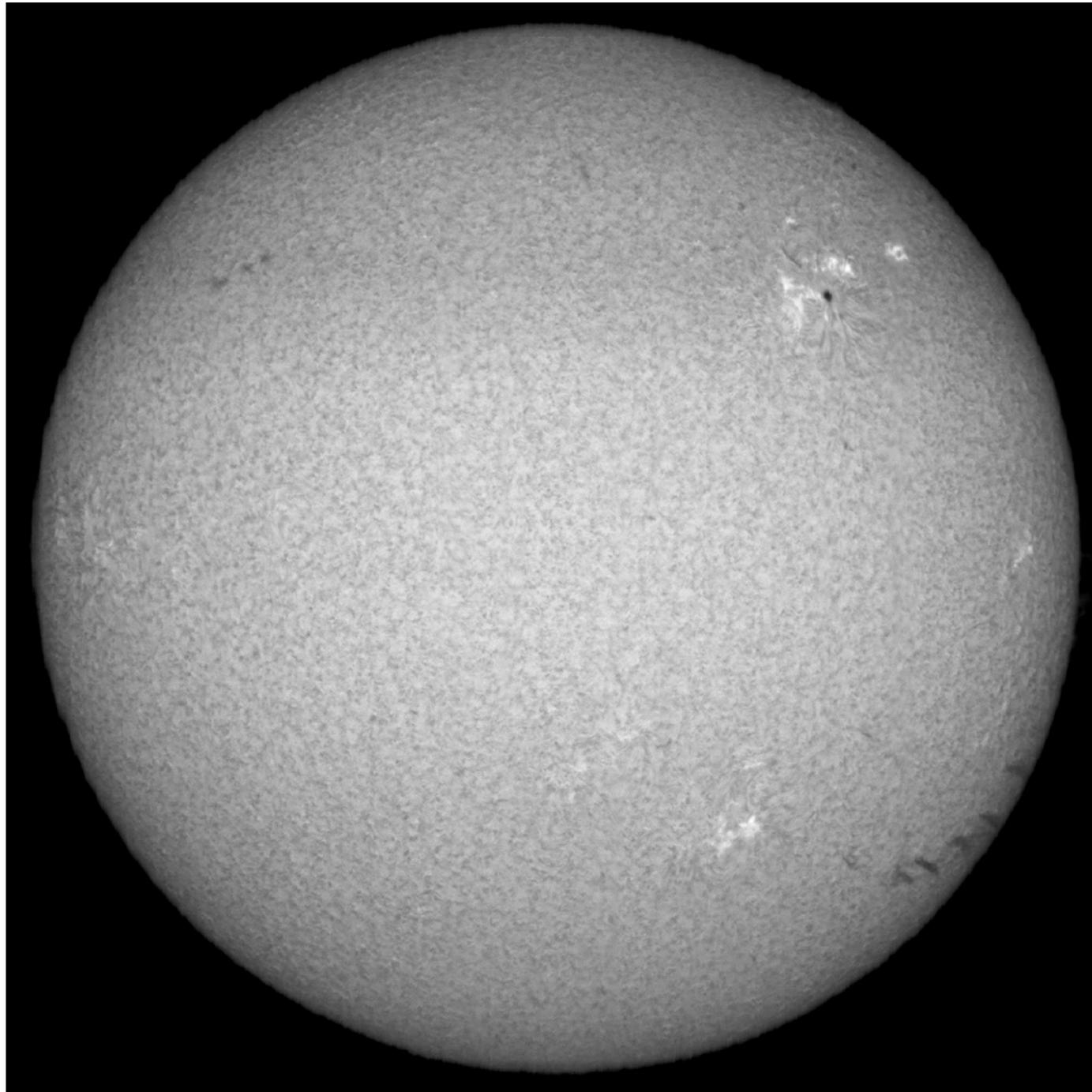
Sol'Ex est un spectrographe à très haute résolution spectrale : $R = \lambda/\Delta\lambda = 40.000$
-> finesse (bande-passante) de 0,16 Å (0,016 nm) au niveau de H-alpha + profil gaussien (plus sélectif que le Lorentzien d'un Fabry-Pérot)



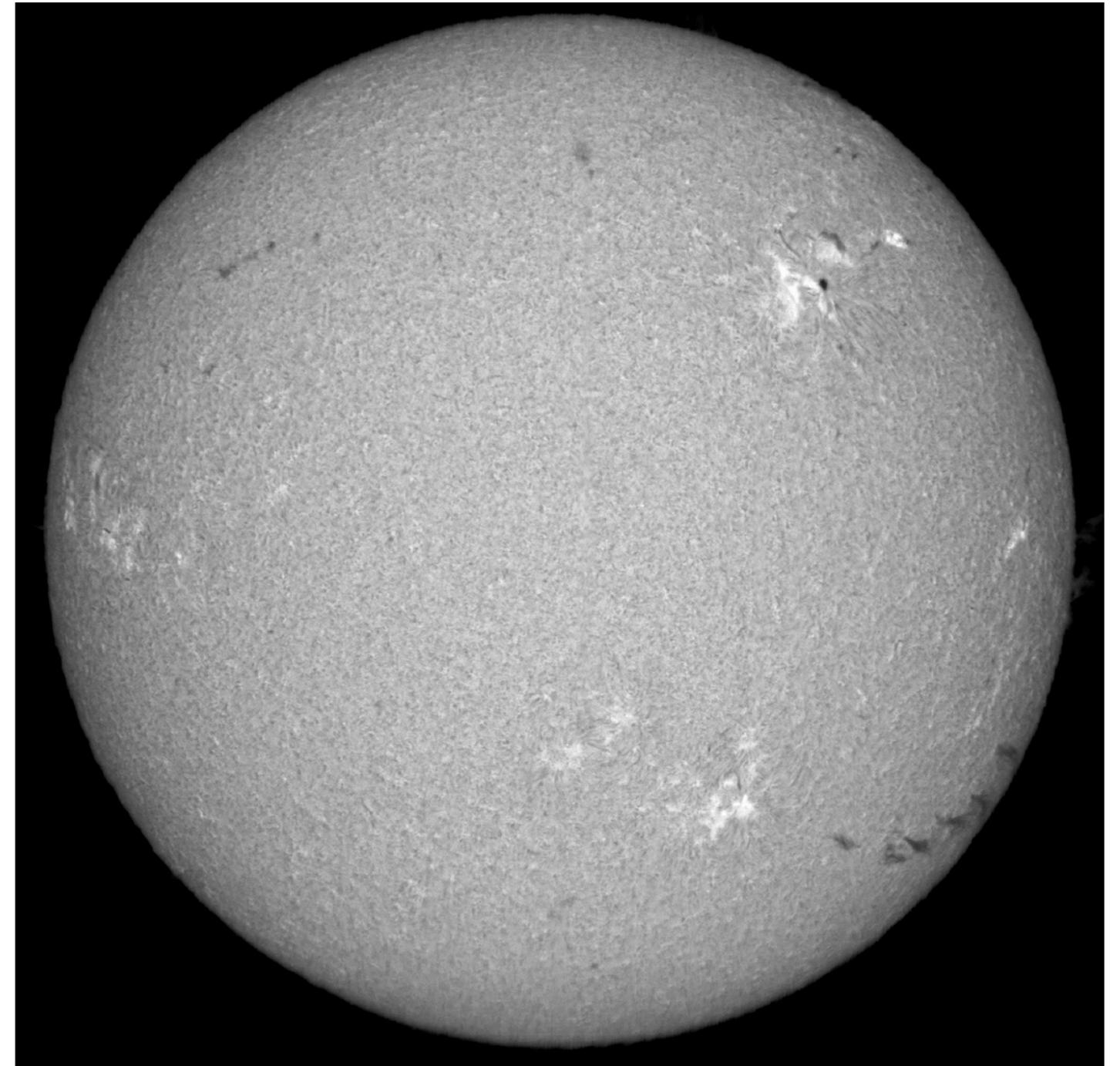
Images
« monochromatiques »
à haut contraste

L'impact de la finesse spectrale : le contraste des images de la chromosphère

2.5-inch refractor f/6.5



Sol'Ex : grating 1200 lines/mm - $\Delta\lambda = 0,78 \text{ \AA}$



Sol'Ex : grating 2400 lines/mm - $\Delta\lambda = 0,16 \text{ \AA}$

Forces et faiblesses de Sol'Ex

Les forces

Finesse spectre élevée : 0,2 Å - 0,3 Å (H-alpha)
(contraste des images, exploration du profil des raies, Doppler, champ magnétique...)

Capacité de sélectionner la longueur d'onde d'observation (H-alpha, H-beta, Helium, Magnésium, calcium, continuum...)

Instrument très léger (200 grammes sans caméra) et compact facile à installer sur une petite lunette (50 mm - 120 mm)

Possibilité de construire l'instrument soi-même et de l'adapter : rassurant et expérience pédagogique

Robustesse : pas de détérioration dans le temps

Faible coût : moins de 800 euros (hors caméra)

Les faiblesses

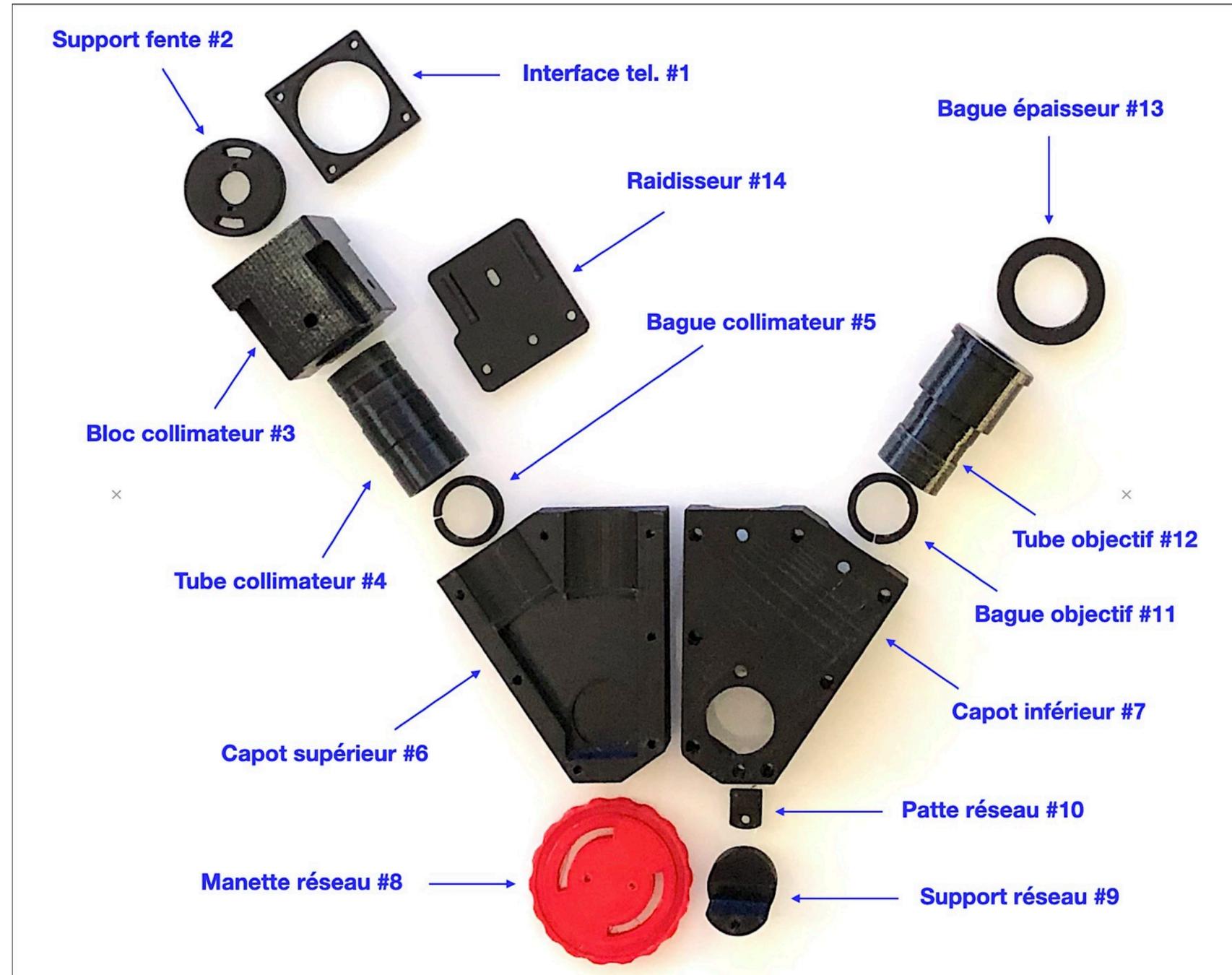
Le concept instrumental peut faire peur et n'a pas bonne presse (complexité, poids...) - **mais plusieurs centaines d'utilisateurs se sont déjà lancés sans compétence a priori**

La prise de vue n'est pas instantanée mais séquentielle (durée de 10 à 20 secondes) - **mais au bout de ce temps, l'image est quasi directement exploitable (contraste, homogénéité...)**

Traitement difficile (exploitation d'un lourd fichier SER, corrections géométrique) - **mais gros effort sur le volet logiciel : traitement transparent, rapide et en un click !**

Sensibilité à la turbulence. Sélection d'image moins efficace qu'en imagerie snapshot - **compositage encore possible (stacking), mais moins massif qu'avec un filtre**

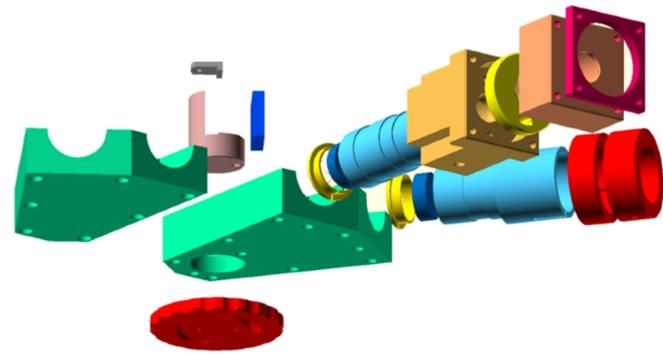
La fabrication



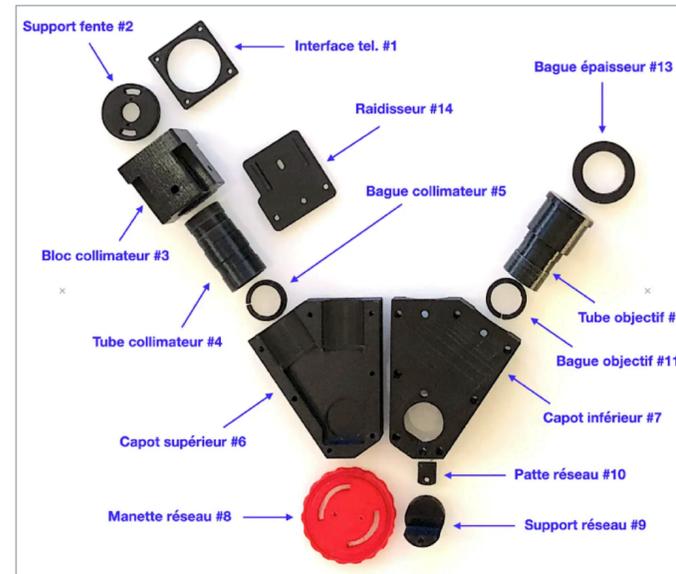
Impression 3D et kit optique

Un site web décrit tous les détails de la construction et de l'utilisation : <http://www.astrosurf.com/solex/>

De nombreuses vidéos sont disponibles pour vous guider... et une large communauté peut vous aider (listes, forum, Facebook...)



Nombre limité de pièces et formes simples

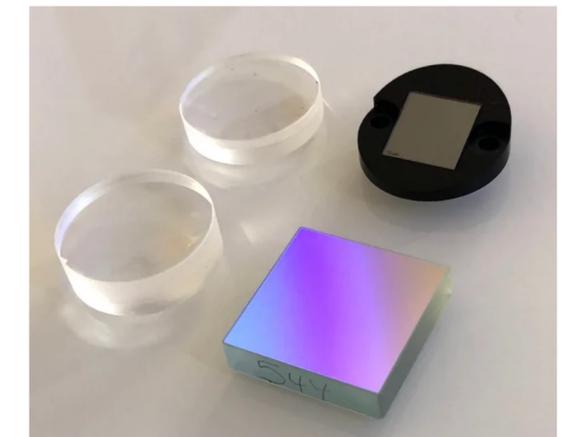


Pour ceux d'entre-vous non familier avec l'impression 3D, certaines entreprises peuvent faire le travail pour vous. Exemple : Azur3Dprint <https://www.azur3dprint.fr/accueil> (178 euros TTC pour un ensemble mécanique totalement monté + l'extension Sol'Ex+ quelques surprises..., 120 euros TTC en pièces détachées)

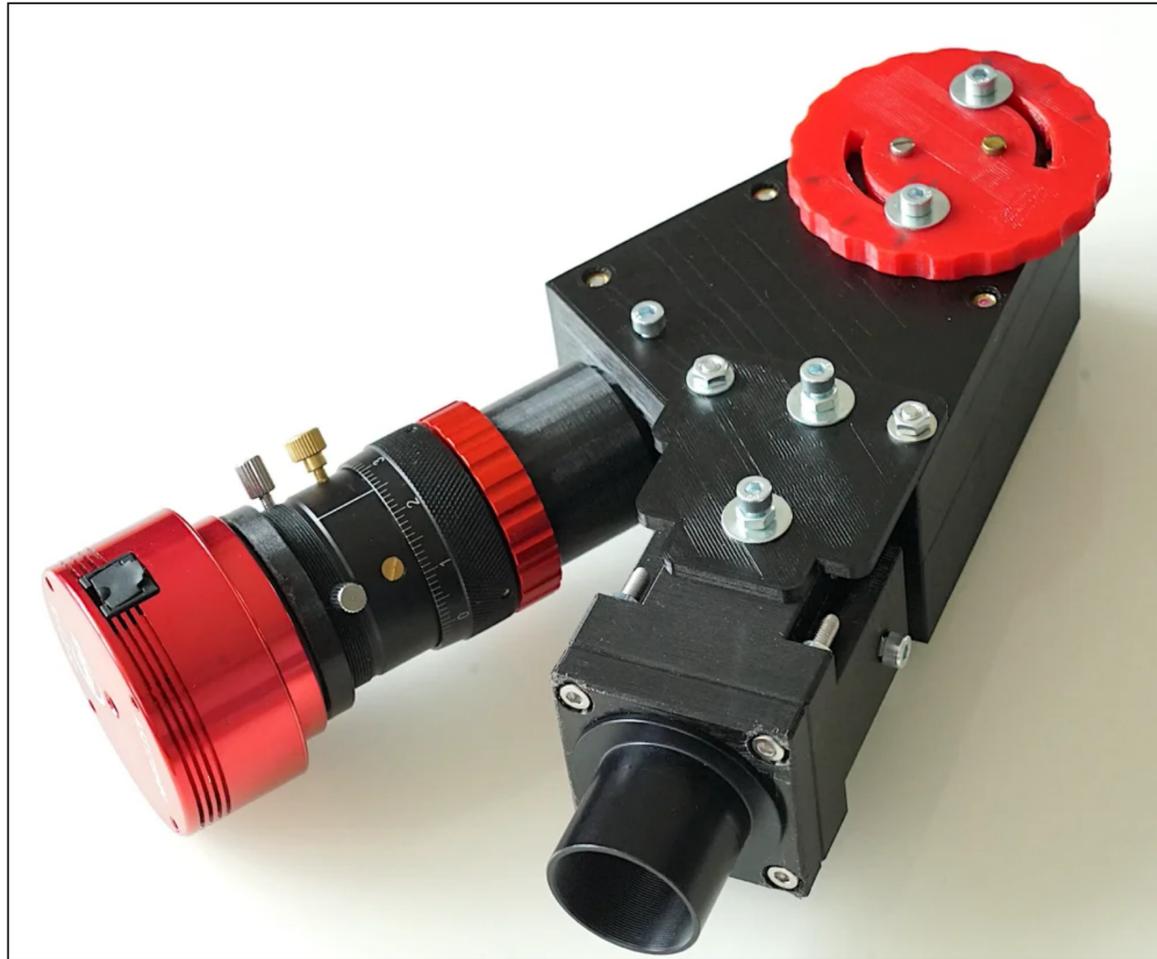


Un kit optique est disponible auprès de Shelyak : <https://www.shelyak.com/?lang=en>

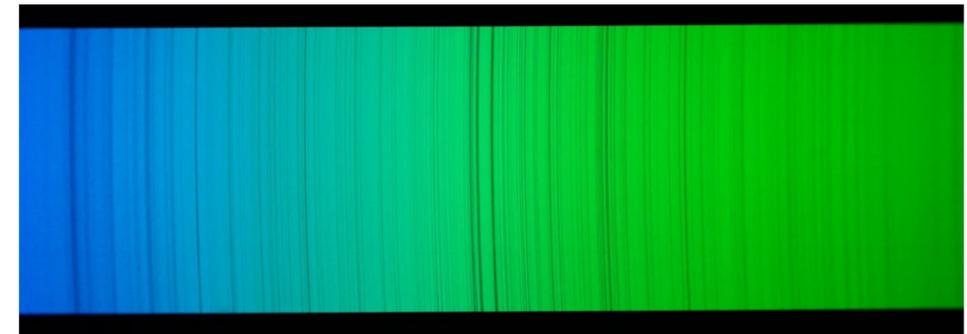
Il comporte un réseau holographique de 2400 lignes/mm, deux objectifs principaux spécialement calculés pour Sol'Ex/Star'Ex/, une fente de 10 microns de large et de 4,5 mm de long haute qualité sur verre, un jeu de composants pour construire Star'Ex.



L'aspect final



Configuration typique pour l'observation solaire



Utilisation d'un appareil photo numérique (pour un projet éducatif, par exemple).

Poids sans la caméra : 200 grammes

Quelques informations complémentaires

Caméra d'acquisition rapide CMOS (monochrome) :
ASI178MM (idéal), ASI290MM, ASI174MM (ou équivalent QHY...)

Focuser helicoïdal très pratique (ZWO, ...)

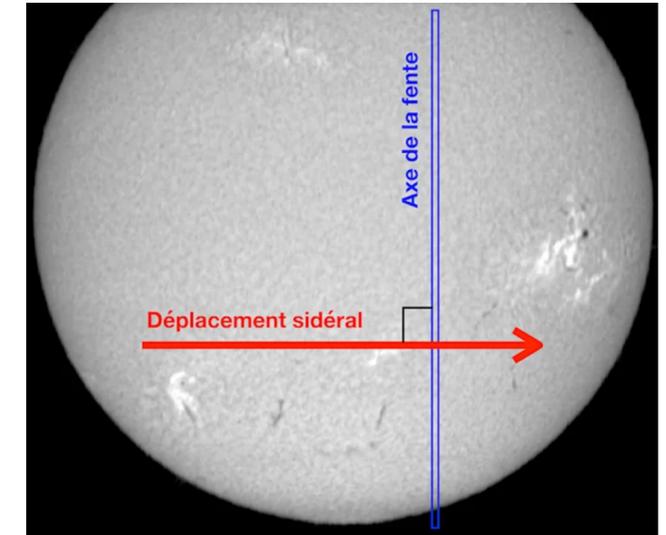
Logiciel d'acquisition de fichiers SER (en 16 bits) :
SharpCap, FireCapture...

PC équipé USB3

Fenêtrage (horizontal) obligatoire pour tenir la « fps »



Apprendre à bien focaliser l'image du disque sur la fente



Comment calculer la fréquence d'acquisition

Pour obtenir un disque presque rond du premier coup, il faut choisir un bon couplage entre la vitesse de défilement forcée choisie (4x, 8x, 16x...) et temps de pose pour chaque trame constituant le balayage, la taille des pixels de la caméra et la distance focale de la lunette.

- si V est le multiple de la vitesse sidérale adopté (V = 4, 8, 16...);
- si t est le temps d'exposition, en secondes;
- si p est la taille des pixels de la caméra (après binning), en microns;
- si F est la focale de la lunette, en millimètres;
- si delta est la déclinaison du Soleil au moment de l'observation,

Alors le temps t de pose à adopter pour obtenir un disque rond est donné par la formule :

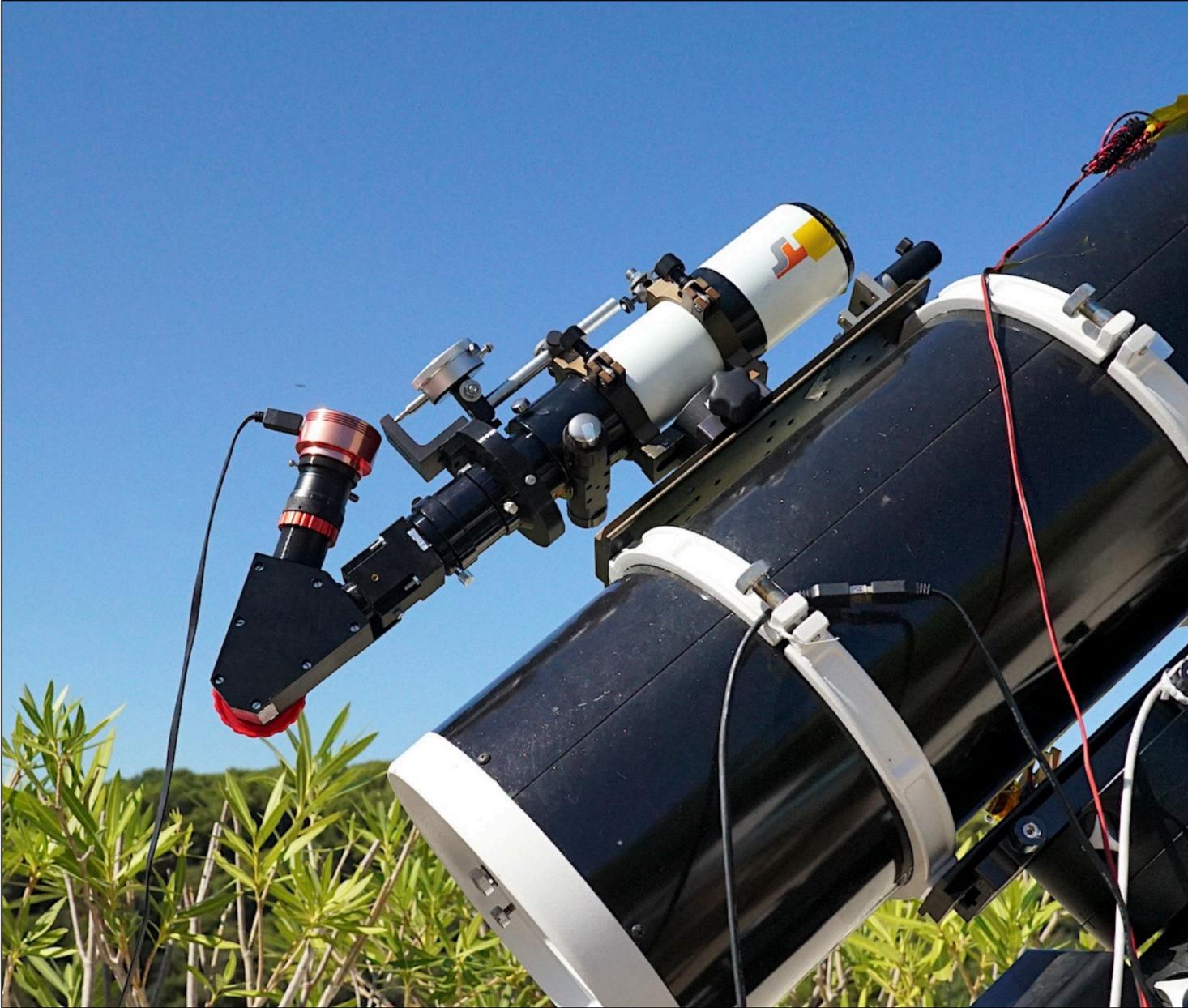
$$t = (8,79 \cdot p) / (F \cdot V \cdot \cos(\delta))$$

Prenons un exemple. On utilise une lunette de 420 mm de focale (F = 420), avec Star'Ex équipé d'une caméra ASI178MM exploitée en binning 2x2, soit une taille de pixel de 2 x 2,4 microns = 4,8 microns (p = 4,8). On décide de balayer le disque solaire à 16x la vitesse sidérale (V = 16). Au moment de l'observation, la déclinaison équatoriale du Soleil est de 23,42° (delta = 23,42) (pour un calcul expéditif, vous pouvez faire delta = 0°). Après calcul on trouve :

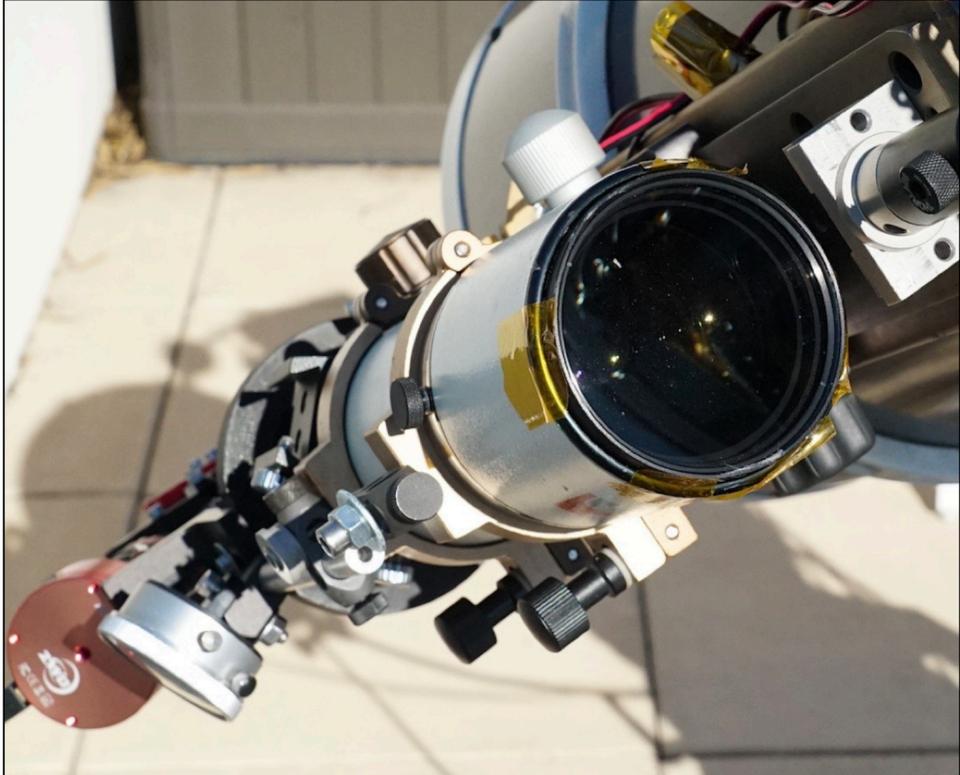
$$t = (8,79 \cdot p) / (F \cdot V \cdot \cos(\delta)) = (8,79 \cdot 4,8) / (420 \cdot 16 \cdot \cos(23,42)) = 0.00684 \text{ seconde}$$

Fréquence d'acquisition images dans le SER : 1/0.00684 = 146 images par seconde (fps)

Sol'Ex en action : atténuation du flux avec une filtre neutre photographique/cinéma



Sur modèle TS, D = 65 mm - F = 450 mm - Noter l'usage d'un micromètre de mécanicien pour faciliter la focalisation.



Atténuation du flux pleine pupille par des filtres neutres de taille modérée (82 mm)

Choix de l'atténuation : 8 à 16x typiquement

Sol'Ex en action : atténuation du flux avec un hélioscope d'Herschel



Utilisation d'un hélioscope pour l'atténuation du flux solaire



Plusieurs modèles utilisables
(mais attention à la polarisation)

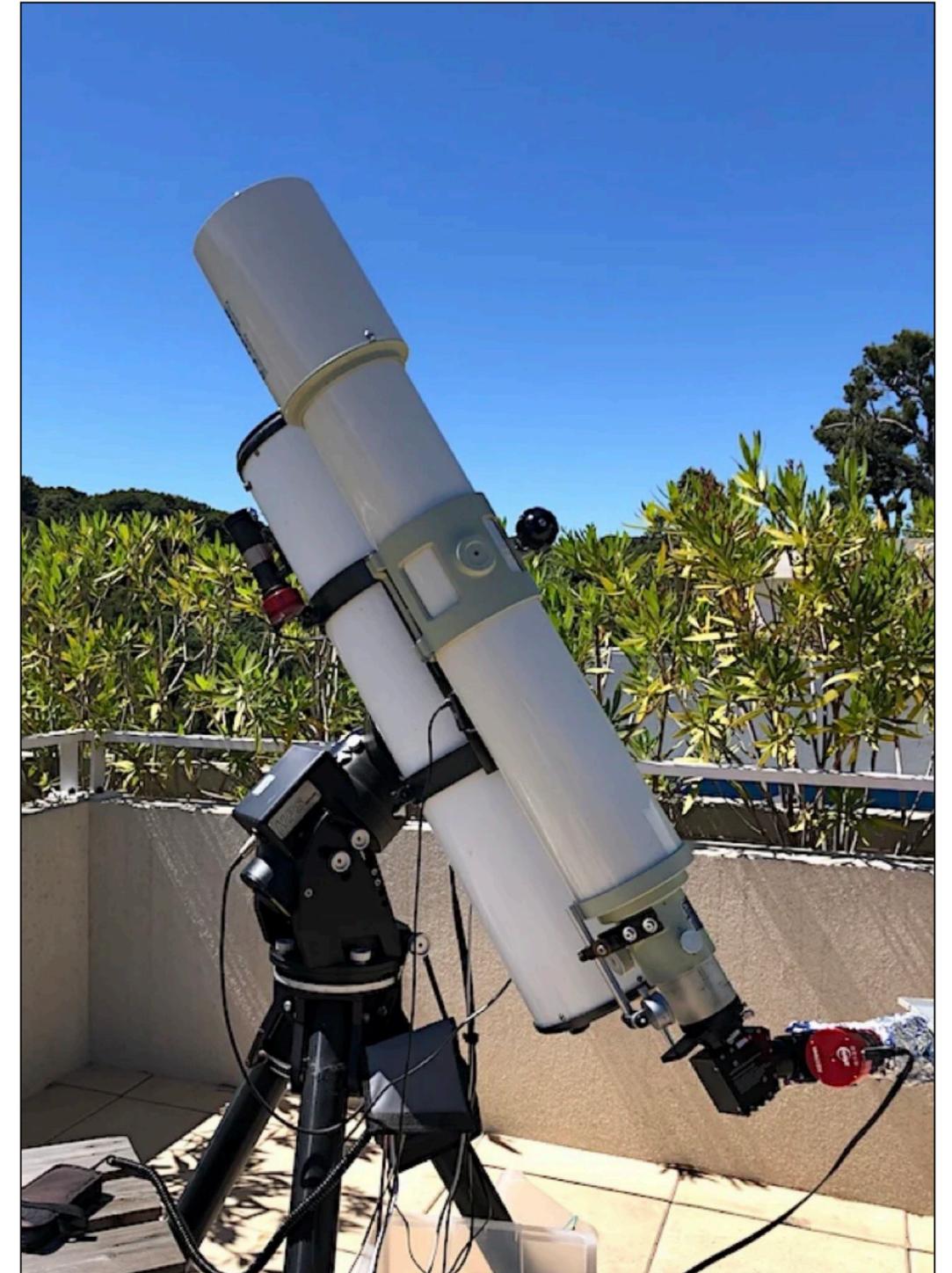
Sol'Ex en action : choix de l'instrument de prise de vue



Avec un petit EVOGUIDE de 50 mm

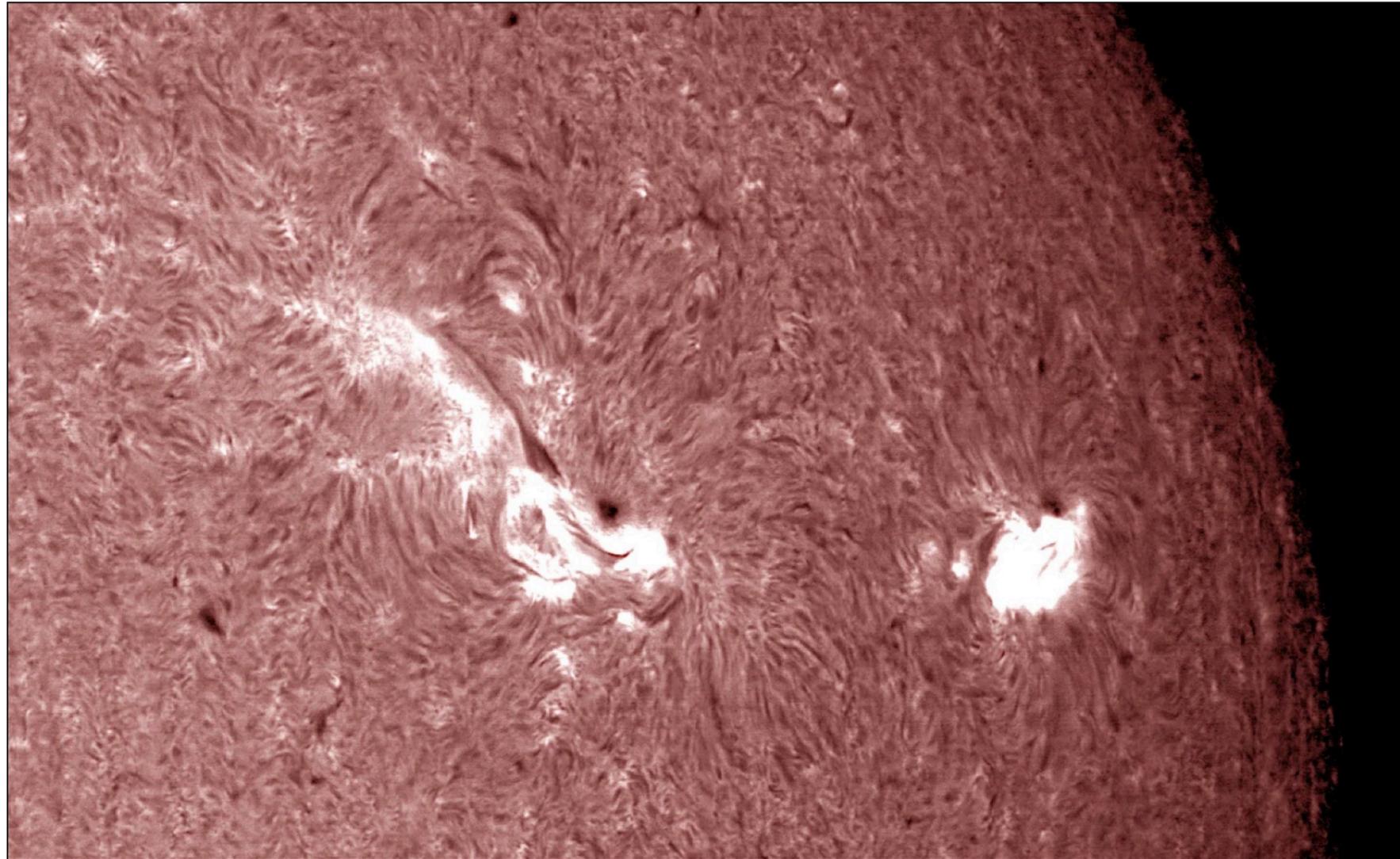


Avec un téléobjectif photographique (Canon 400 mm + 2X extender)



Avec une lunette Takahashi FS128

Longue focale = plus de détails



Détails H-alpha avec une lunette FS128 (F = 1040 mm)



Sol'Ex en action : tout est possible ! (1/2)

Sol'Ex sur un télescope Maksutov ACUTER
D = 60 mm, F= 750 mm (F/D = 12.5) - Prix : 110 euros (!)
(poids : 450 grammes)

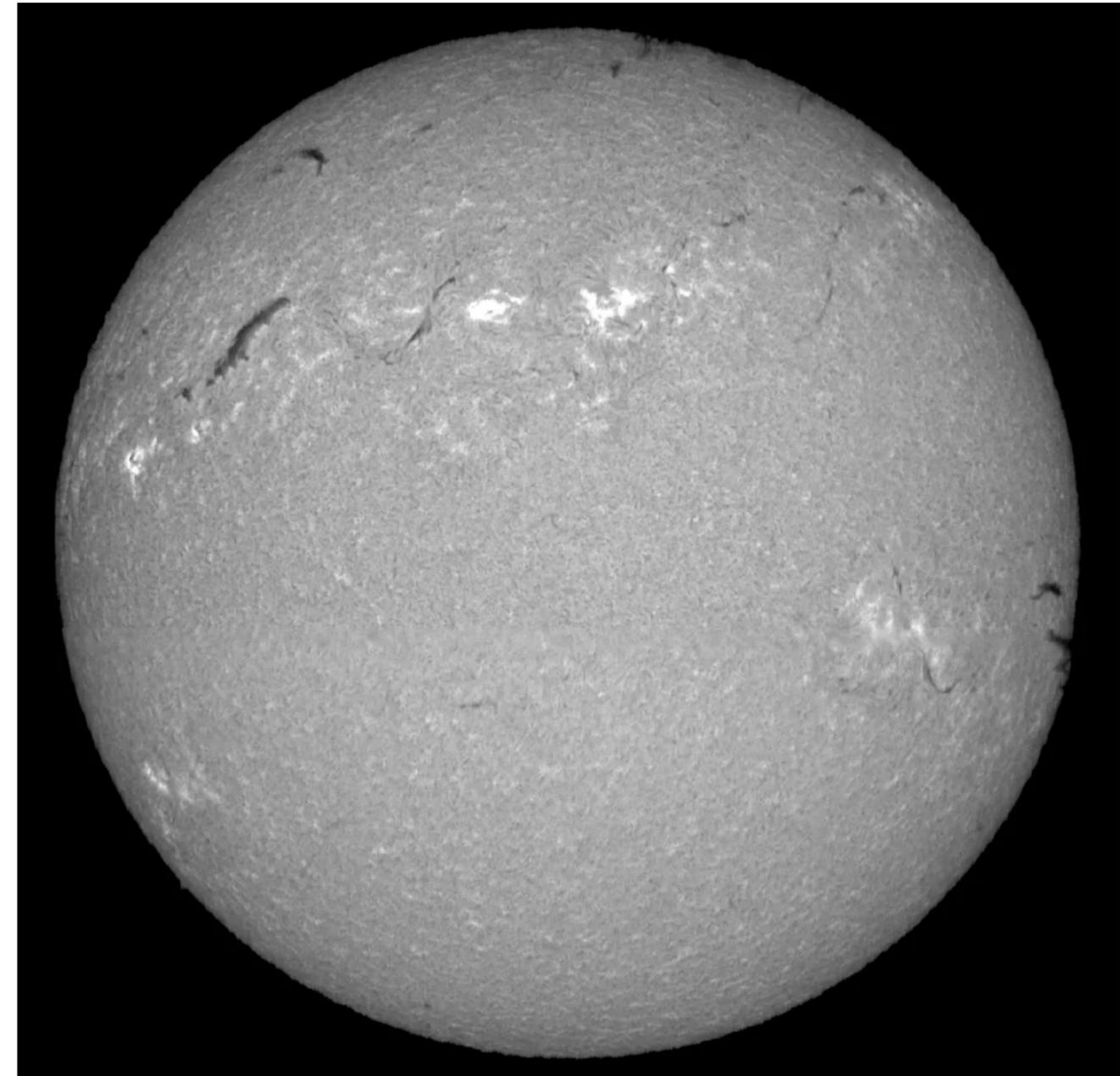


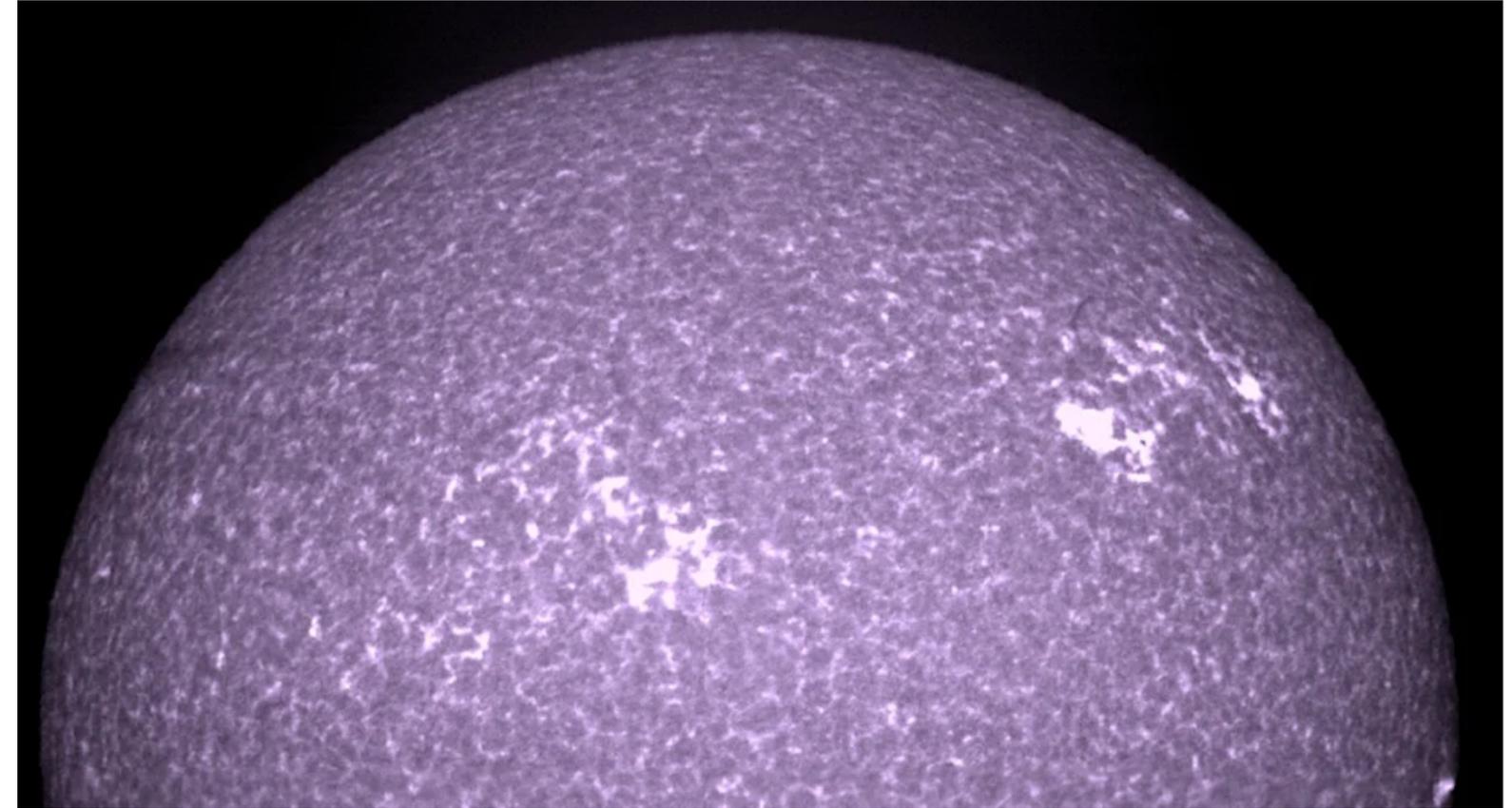
Image du 26 novembre 2021 dans la raie H-alpha avec un tube optique MaksyGO Acuter + filtre ND4

Sol'Ex en action : tout est possible ! (2/2)

Image sur ACUTER de 60 mm - Configuration Maksutov : quasi achromatique et très faible sphérochromatisme dans l'UV (Ca II)



3 décembre 2021 - H α



3 décembre 2021 - Ca II K
(très faible sphérochromatisme dans l'UV)



Grande souplesse offerte par la 3D - interface dédiée + porte filtre :

Limitation du champ image

Longueur de la fente d'entrée de Sol'EX = 4.5 mm

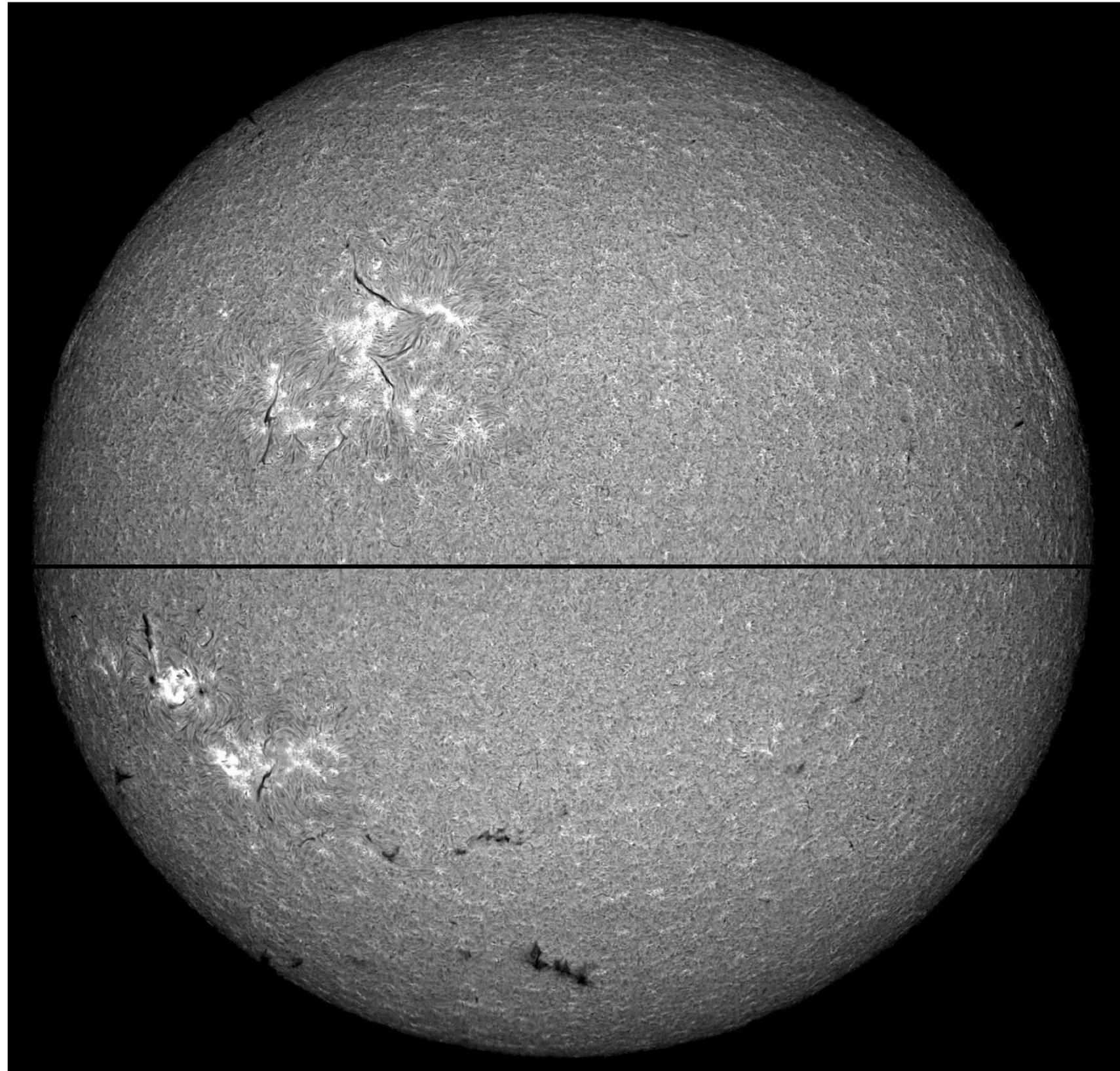
Hypothèse : lunette de focale 480 mm

Diamètre angulaire du Soleil en hiver : 0.5421°
Taille du disque au foyer = 4,54 mm

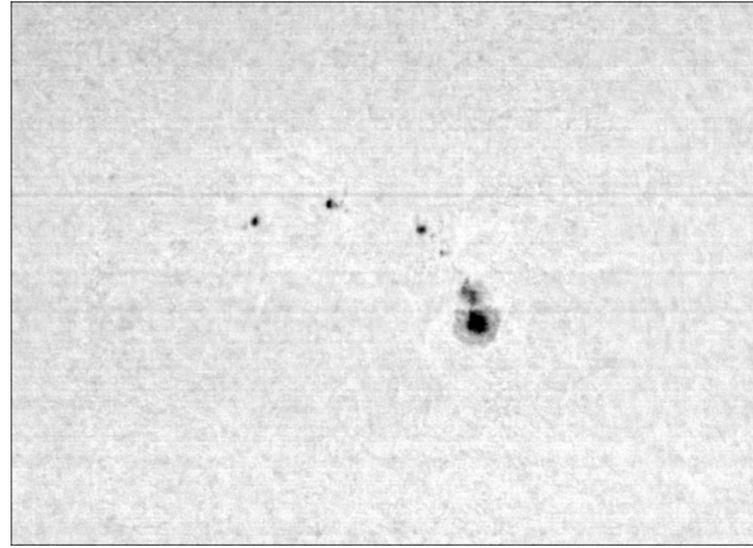
Diamètre angulaire du Soleil en été : 0.5243°
Taille du disque au foyer = 4,39 mm

Lunette FS128 (F=1040 mm)
Mosaïque en 2 partie (2 scans)

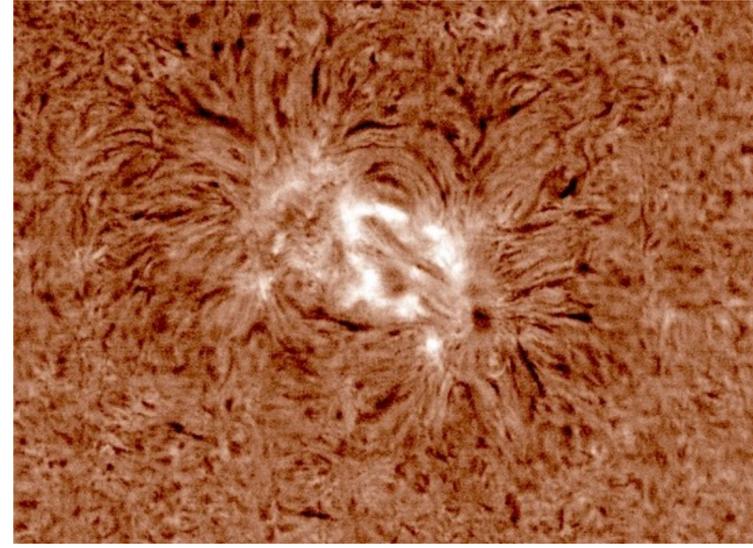
27 juin 2021



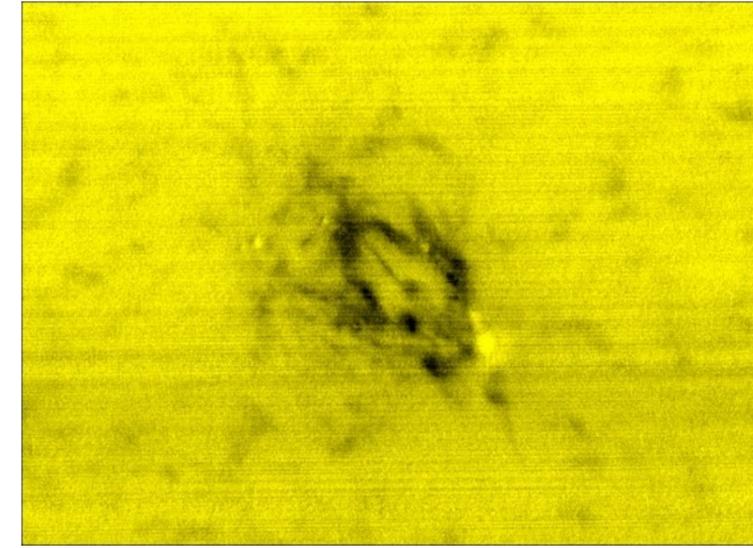
Choix de la raie d'observation : grande liberté !



Continuum (6580 A) - lunette de 65 mm

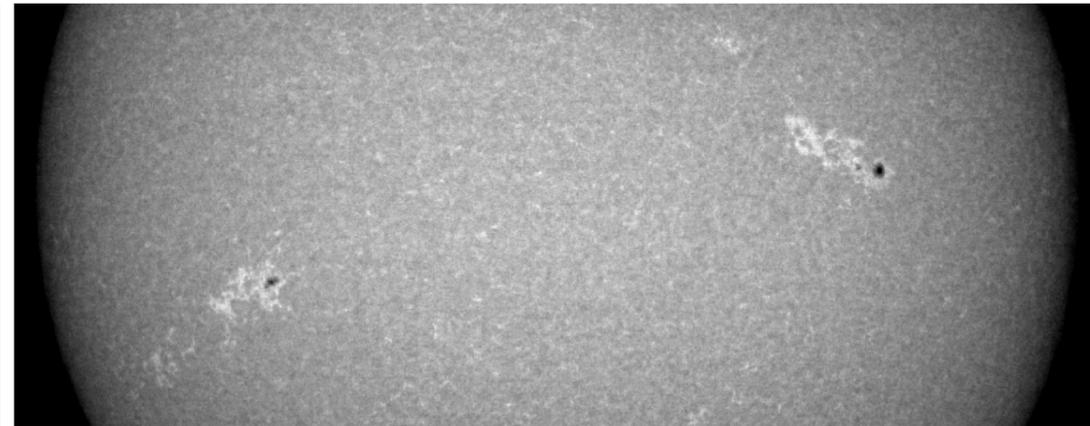
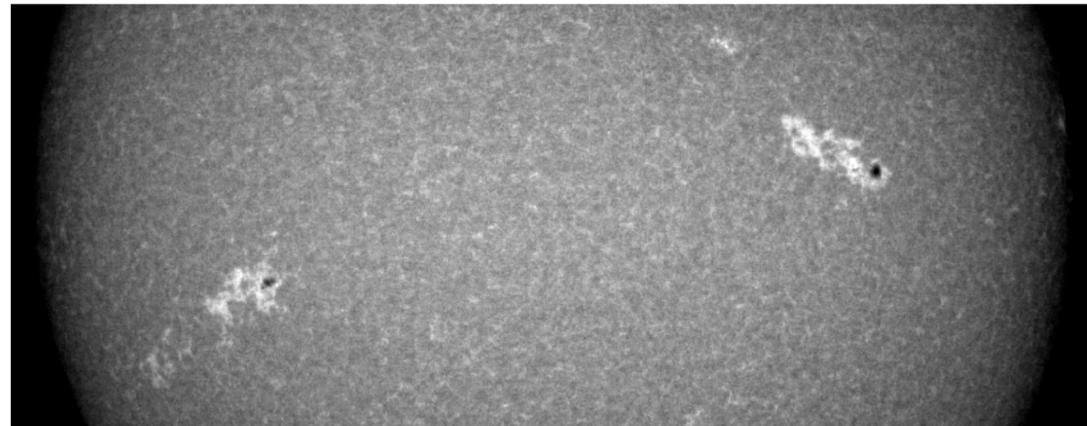
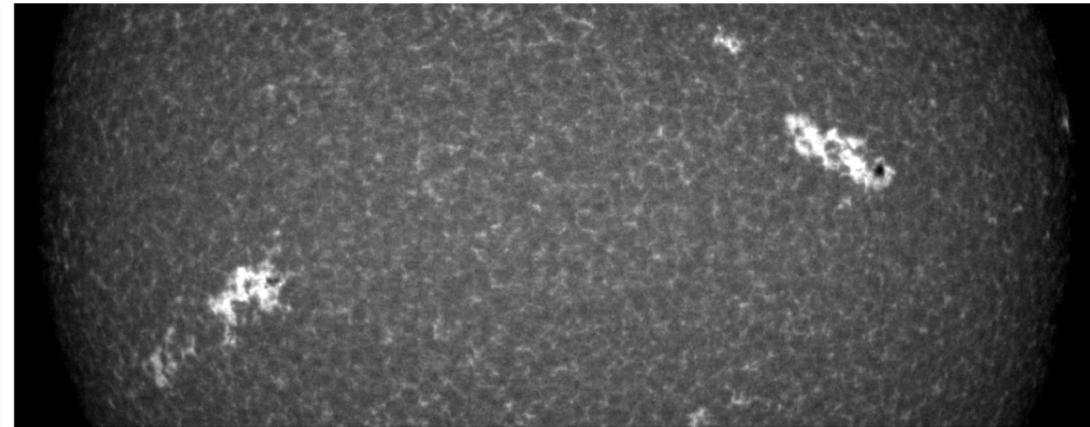
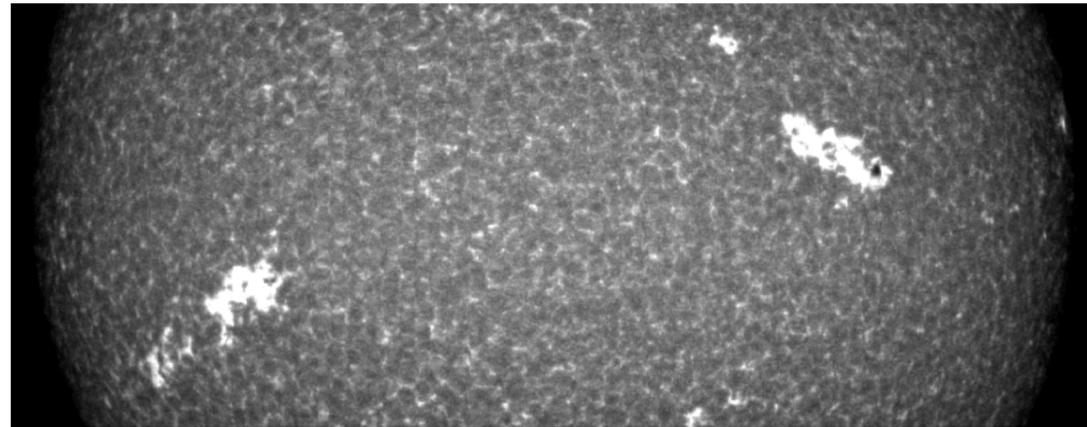


H-alpha (6563 A)



Hélium D3 (5876 A)

Coeur de la raie Ca II K

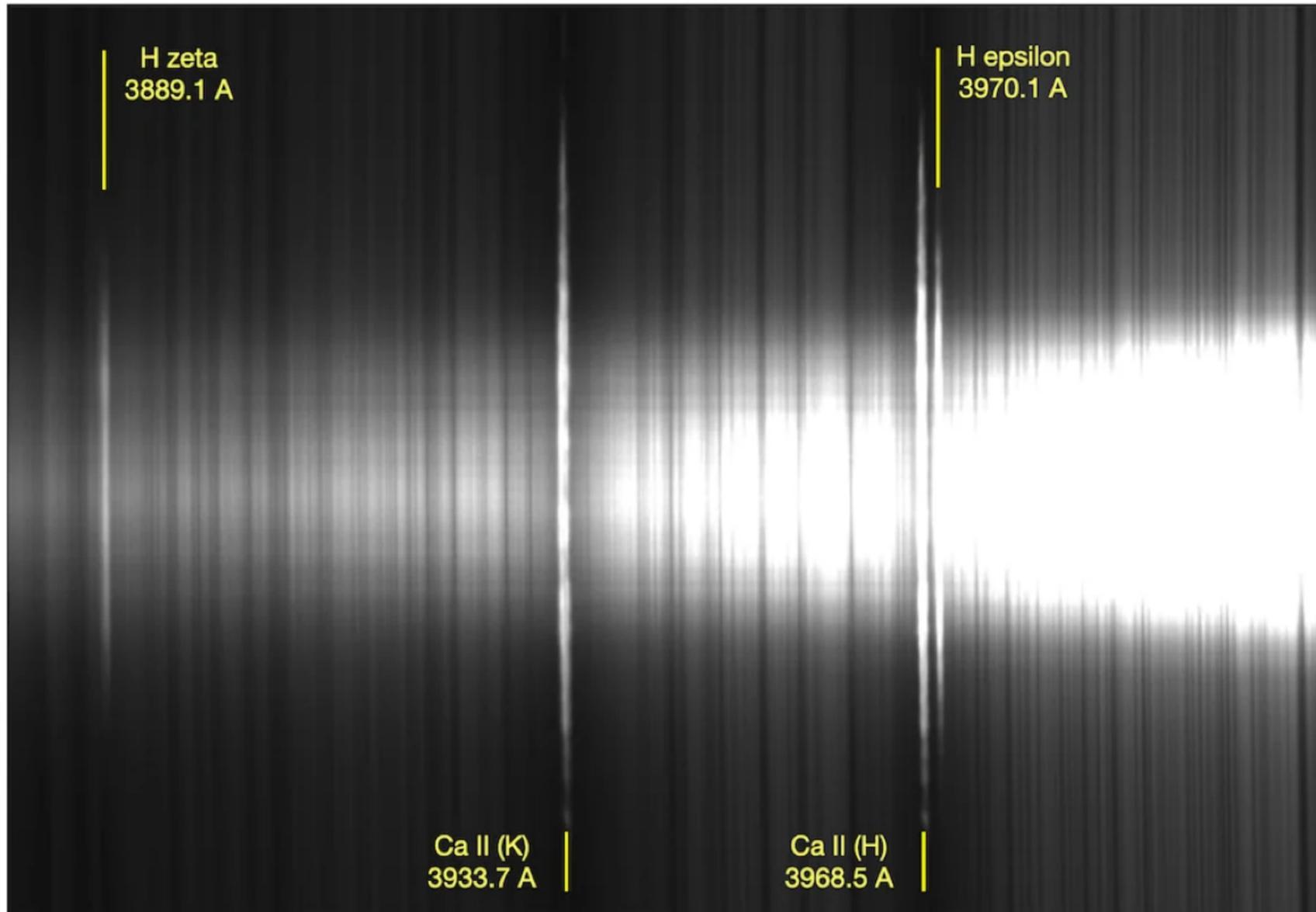


Aile de la raie Ca II K

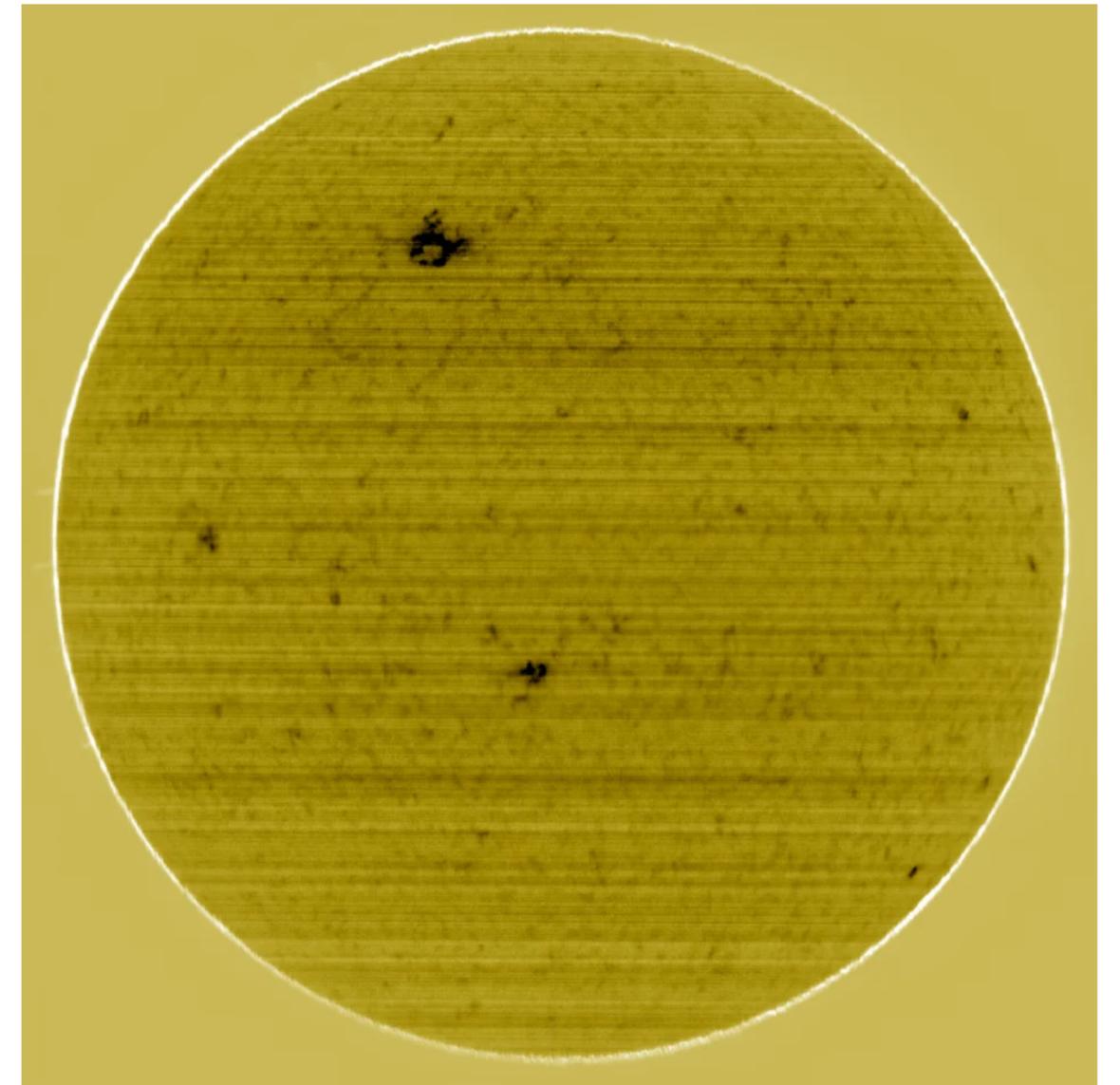
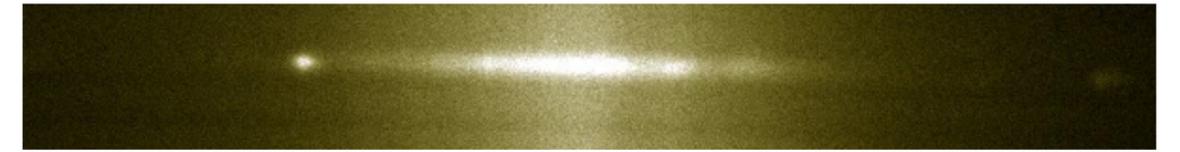


Sondage de la chromosphère

Sol'Ex : observations inédites



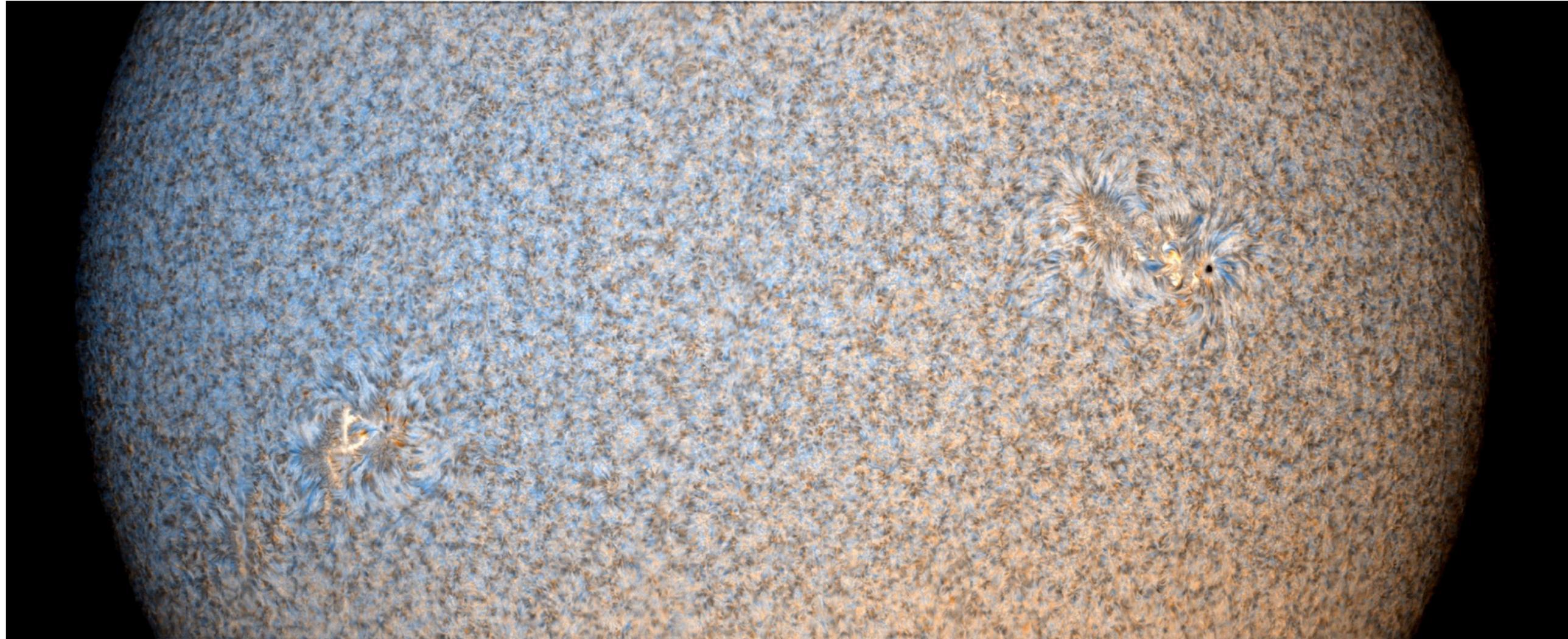
Inversion des raies du calcium et de l'hydrogène au limbe



Raie de l'hélium D3

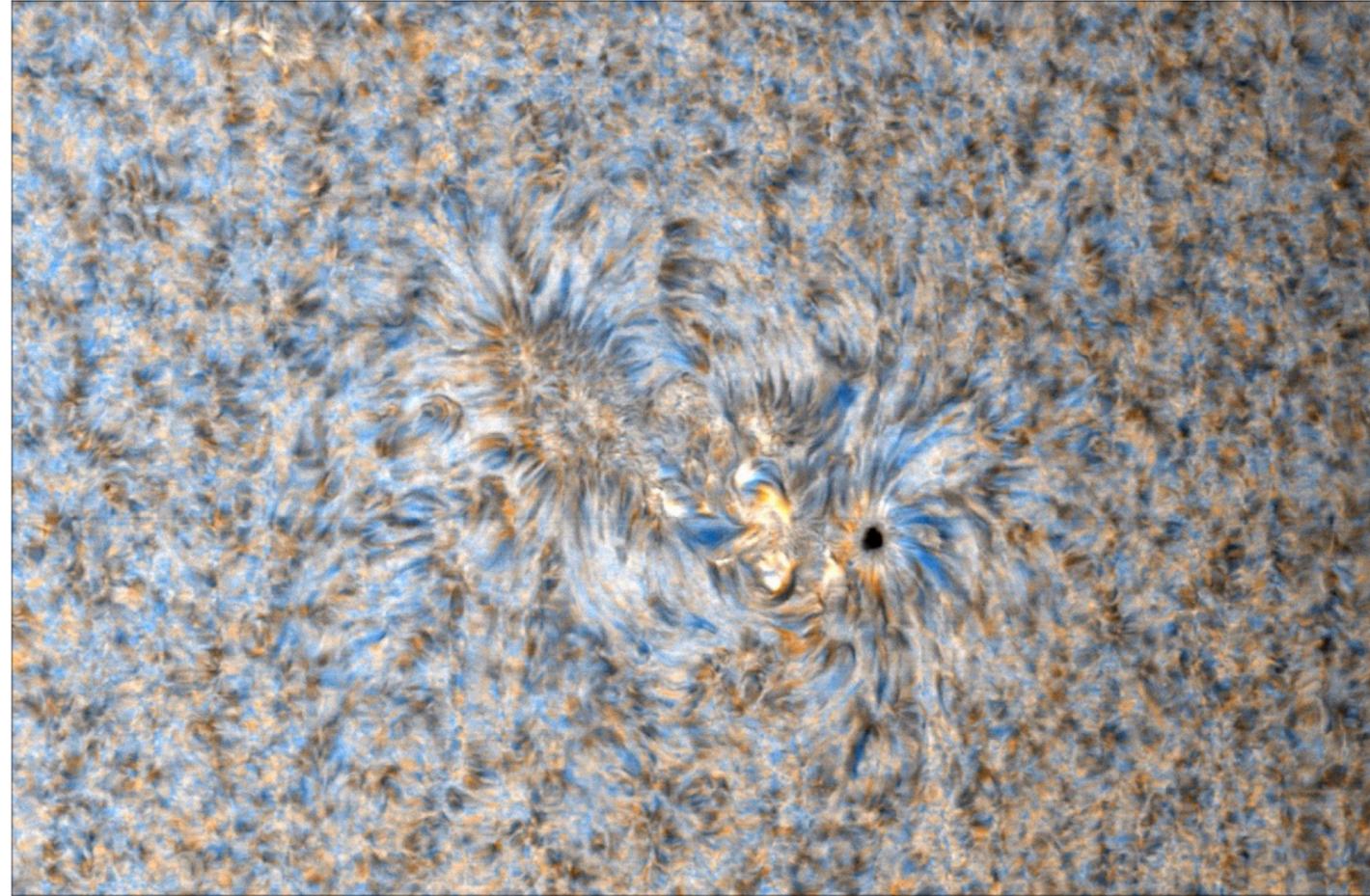
Observation Doppler de la rotation du Soleil

Mesure de la rotation du Soleil par l'observation du décalage Doppler de la raie H-alpha (entre le bord est et le bord ouest)



Dopplergramme : vue dynamique de la surface (vision 3D)

Détail du champ de vitesses radiales



Les intensités informent sur la vitesse et la couleur sur la direction radiale des gaz.

Observation de protubérances

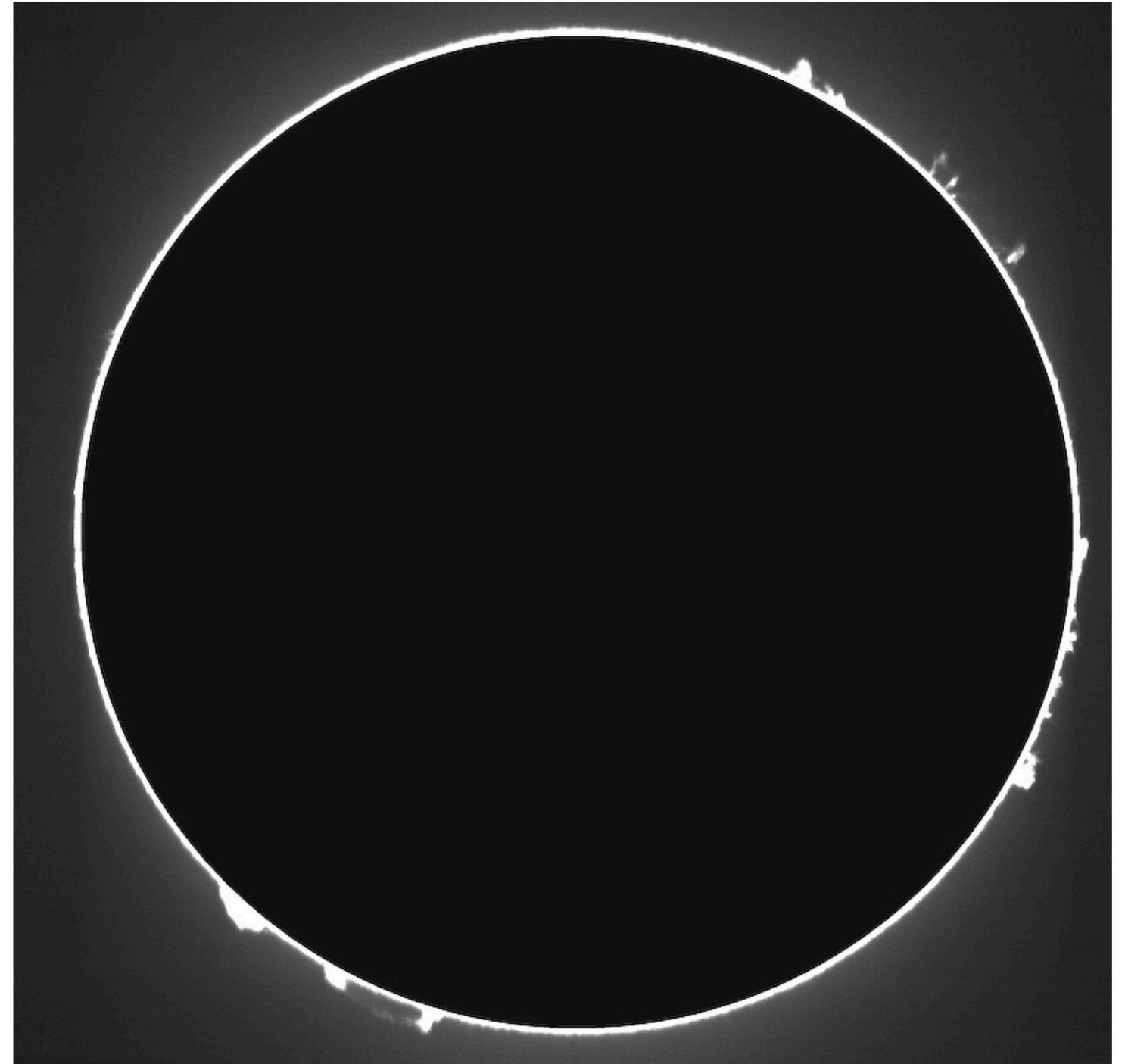
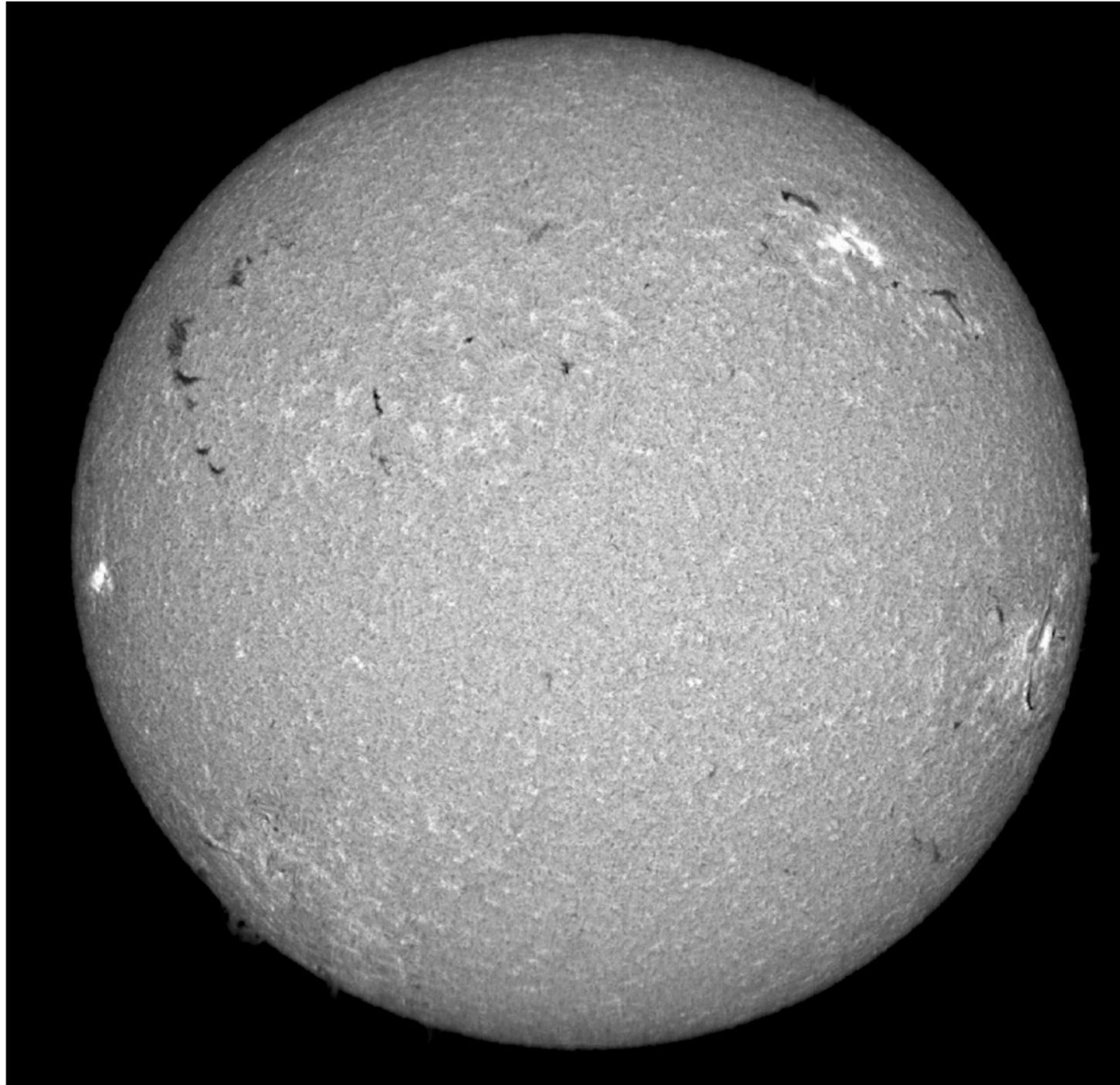
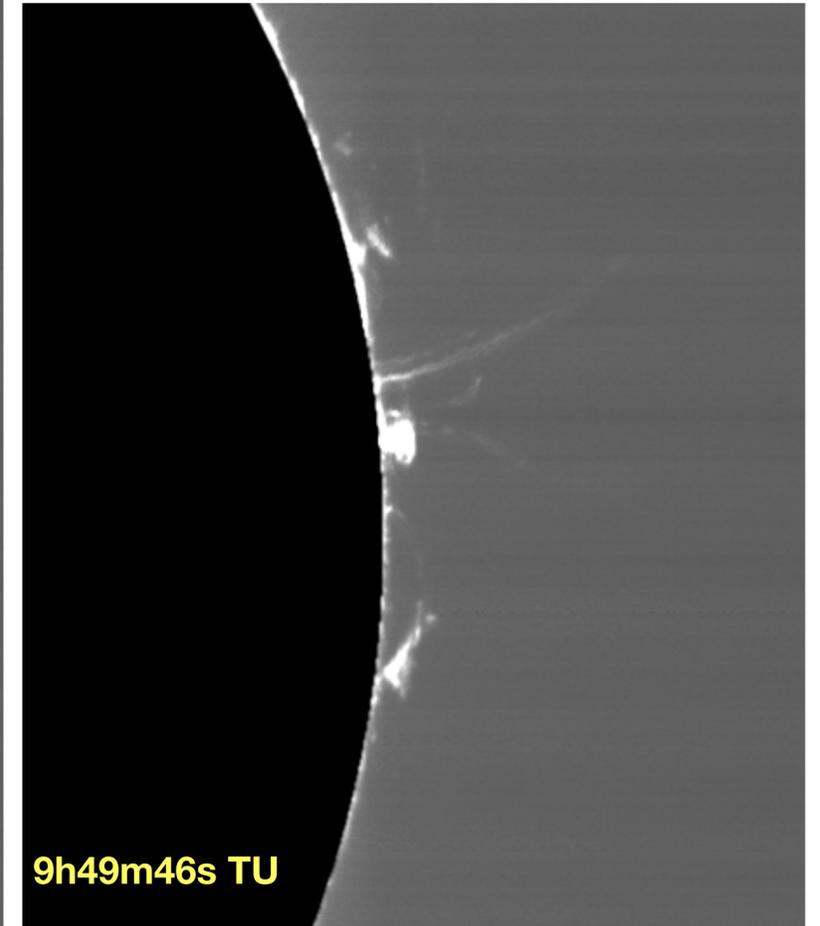
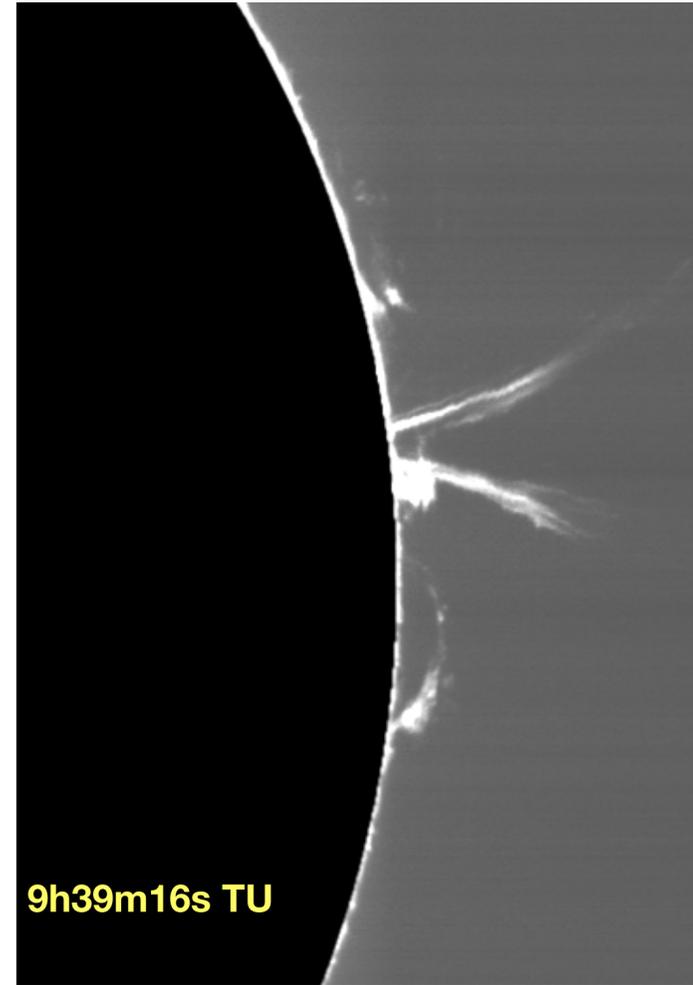
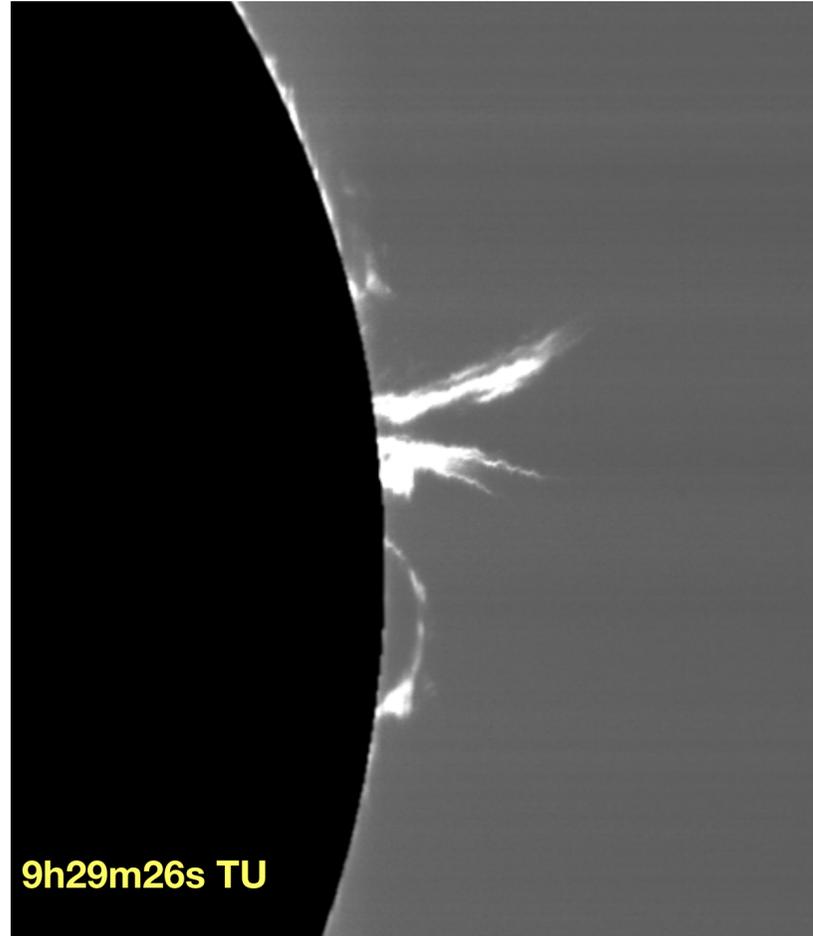
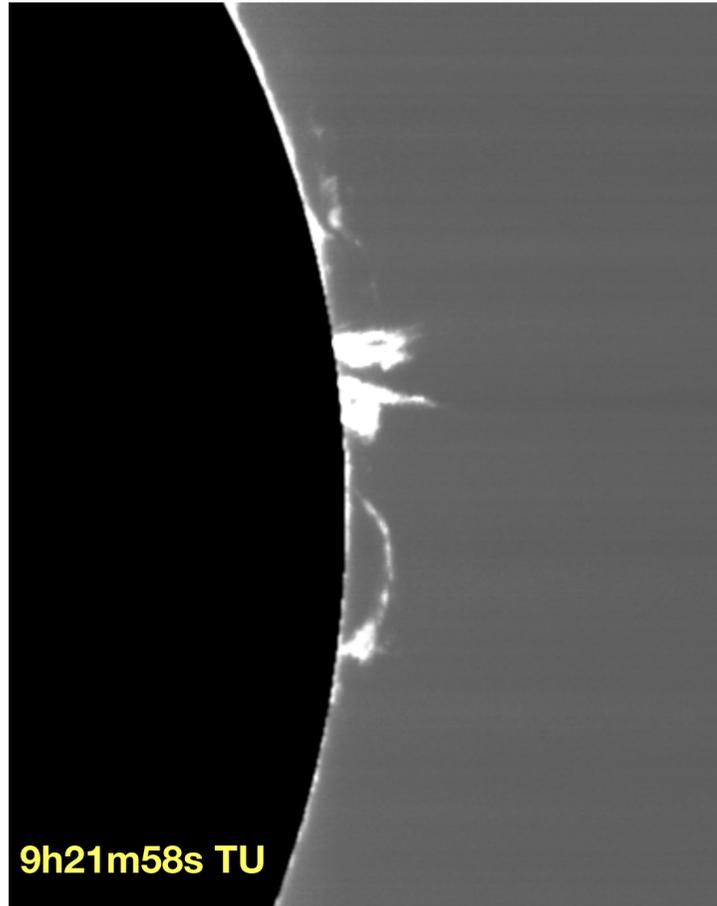


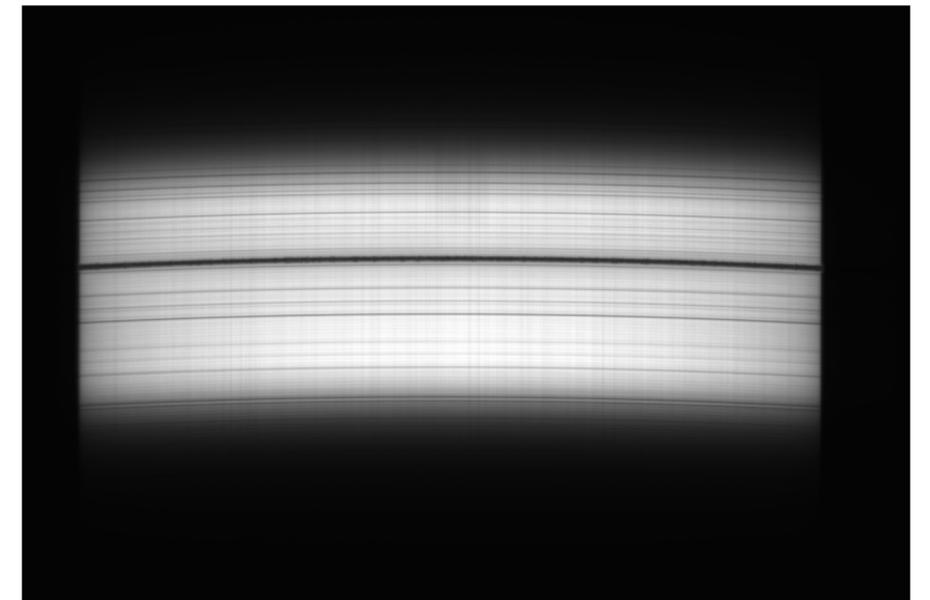
Image H-alpha - Sol'Ex standard + caméra ASI178MM, sur lunette TS (D = 65 mm, F = 420 mm)
Date: 16 novembre 2021

Observation à haut contraste

1 mai 2022 - Sol'Ex sur Sky-Watcher 72ED



Utilisation possible et optionnelle d'un pré-filtre à coût modéré pour un accroissement du contraste (ici un Astrodon H-alpha 6 nm)



L'observation du champ magnétique (1/4)

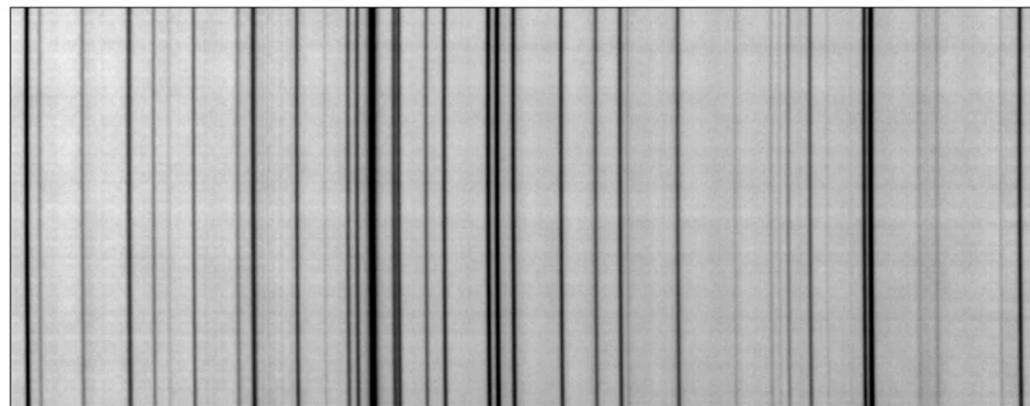
L'application « magnétogramme » est typique du projet Sol'Ex : possibilité de pratiquer des expériences physiques pointues (effet Zeeman) de manière économique et ludique



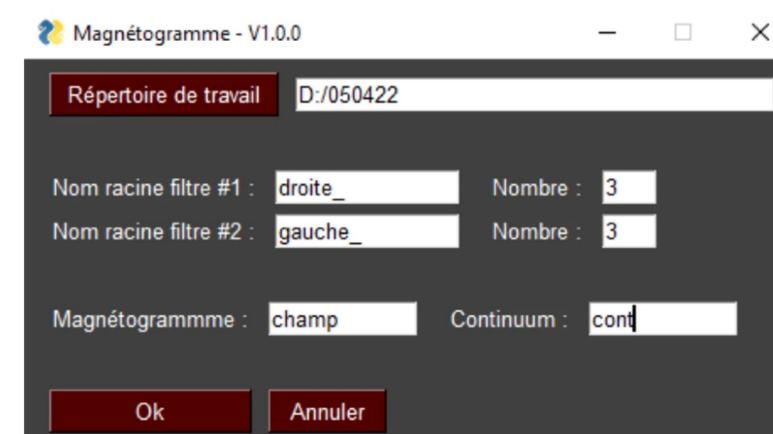
Porte filtre en impression 3D



Mesure de la polarisation circulaire en détournant des lunettes de cinéma 3D



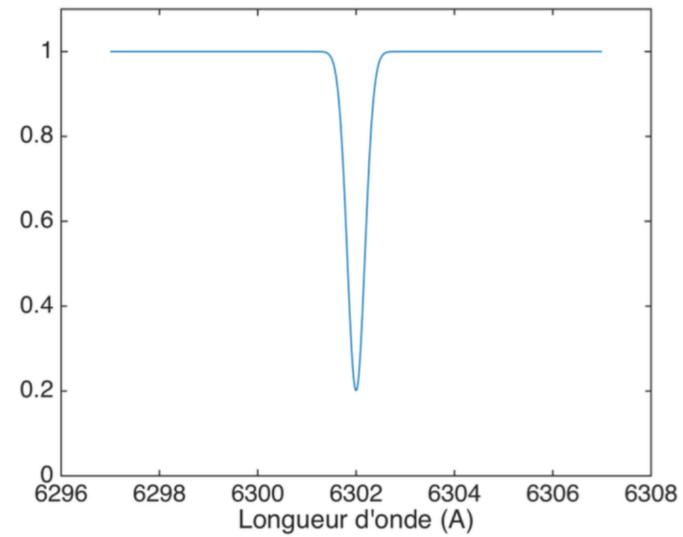
Fe I 6173 A ($g = 2.50$)



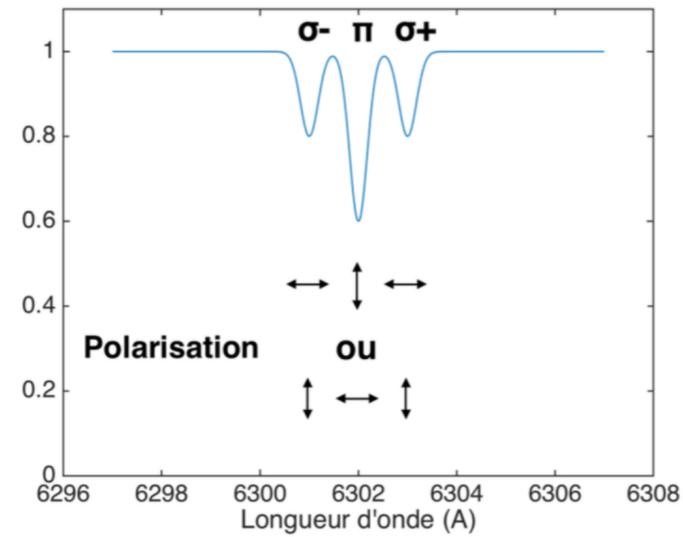
Outil logiciel de traitement fourni

L'observation du champ magnétique (2/4)

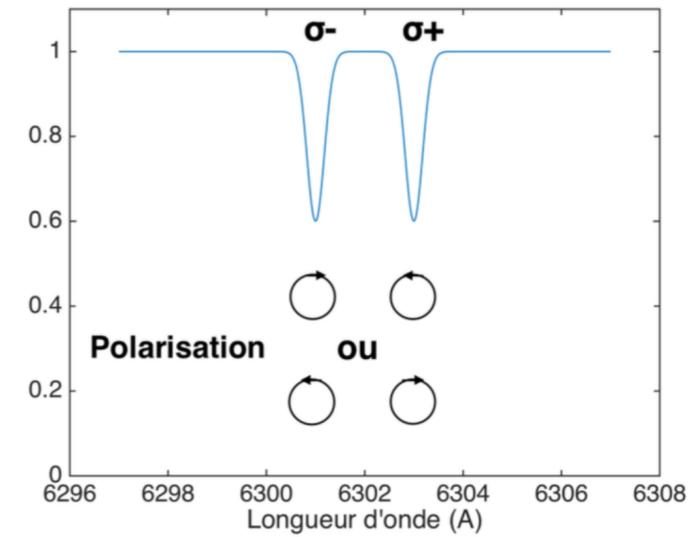
L'effet Zeeman



**Profil spectral en intensité
(pas de champ magnétique)**



**Séparation des raies en présence
d'un champ magnétique transverse**



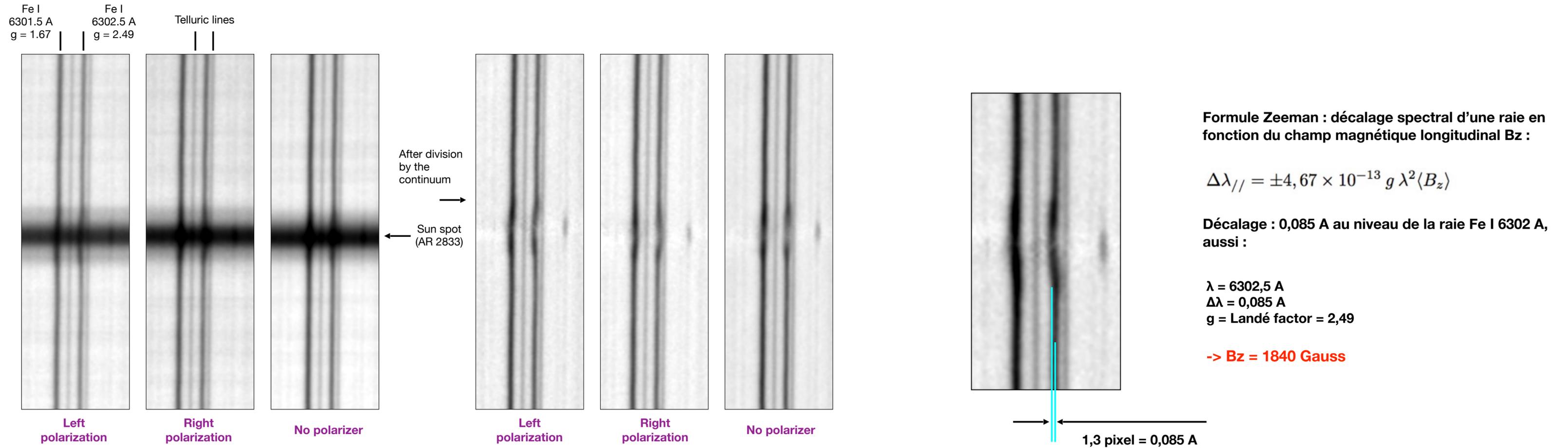
**Séparation des raies en présence
d'un champ magnétique longitudinal**



Les raies sont polarisées circulairement avec un sens de rotation inverse. La séparation des composantes est proportionnelle au champ

L'observation du champ magnétique (3/4)

La haute résolution spectrale de Sol'Ex permet de déceler l'effet Zeeman



L'observation du champ magnétique (4/4)

Magnétogramme (utilisation de la raie Fe I 6173 A)

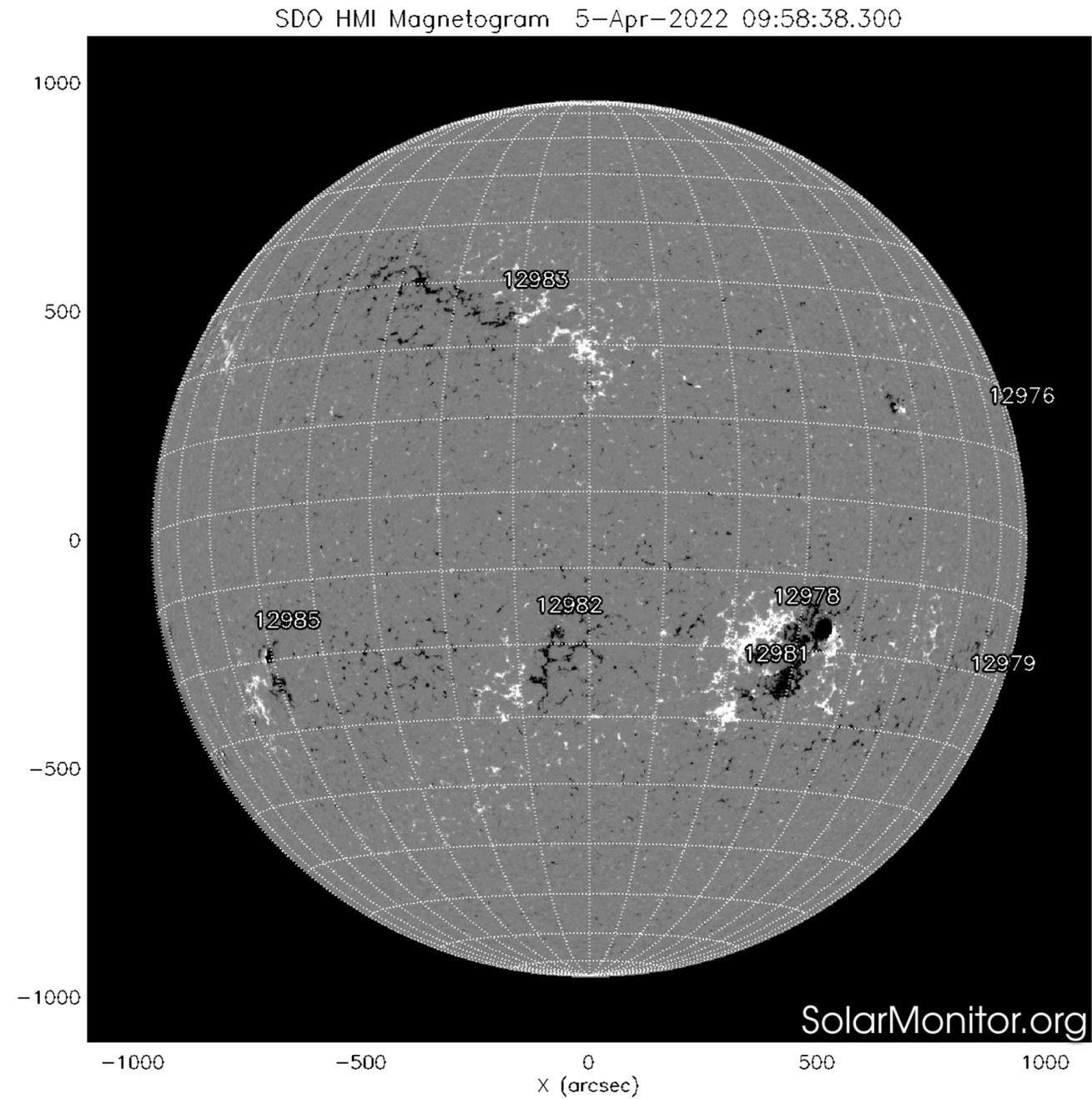


Image SDO le 5 avril 2022

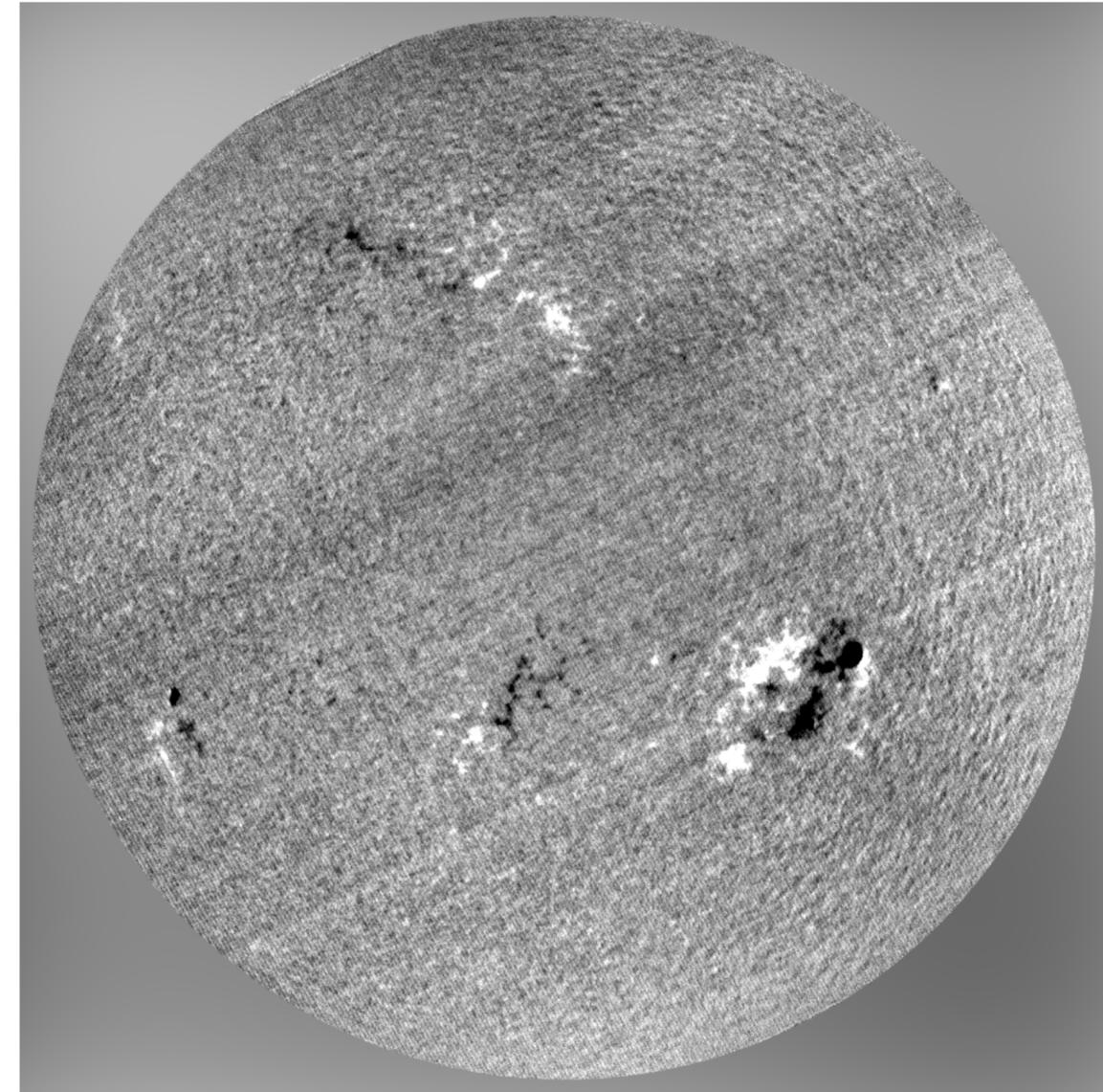
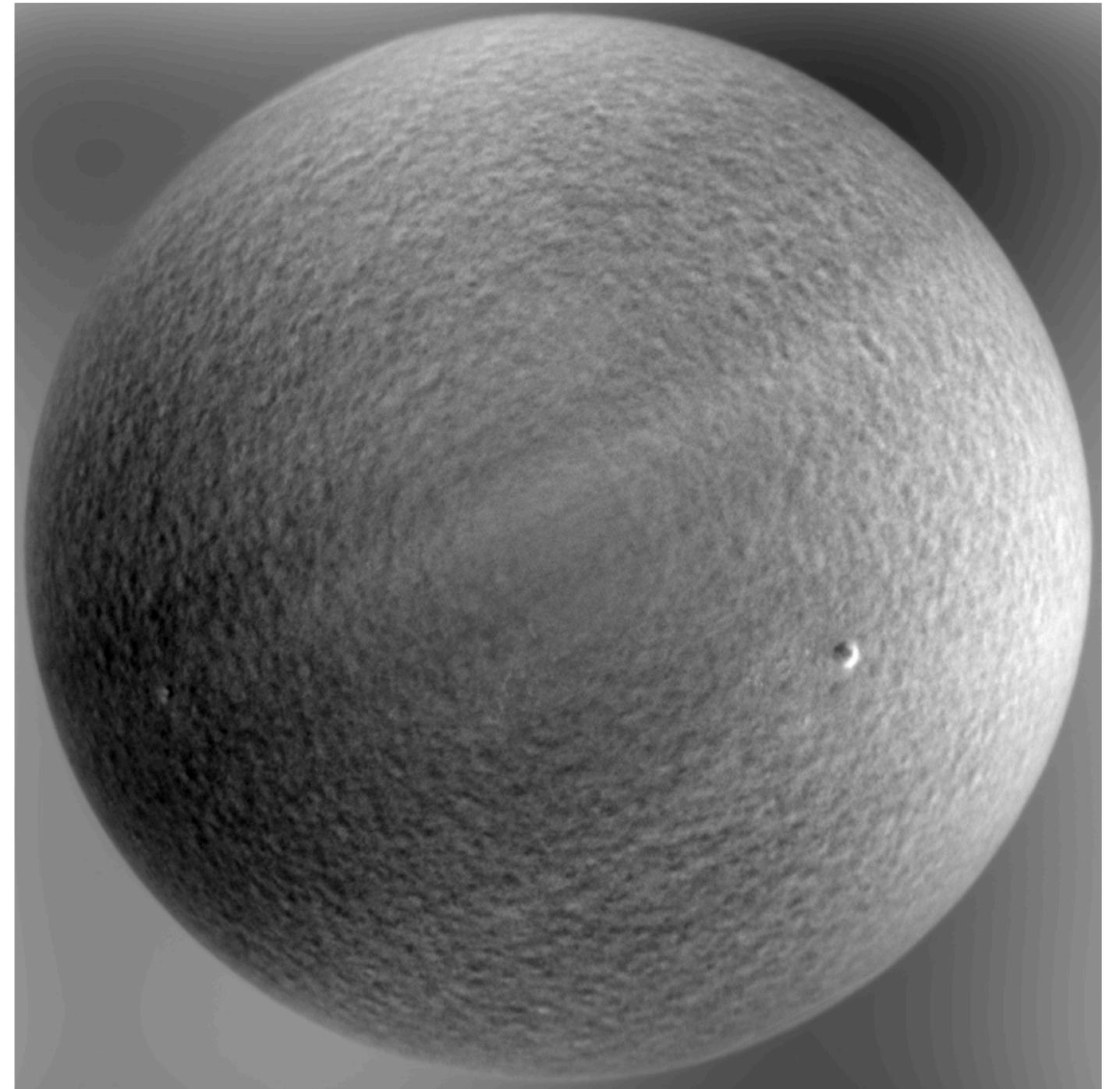
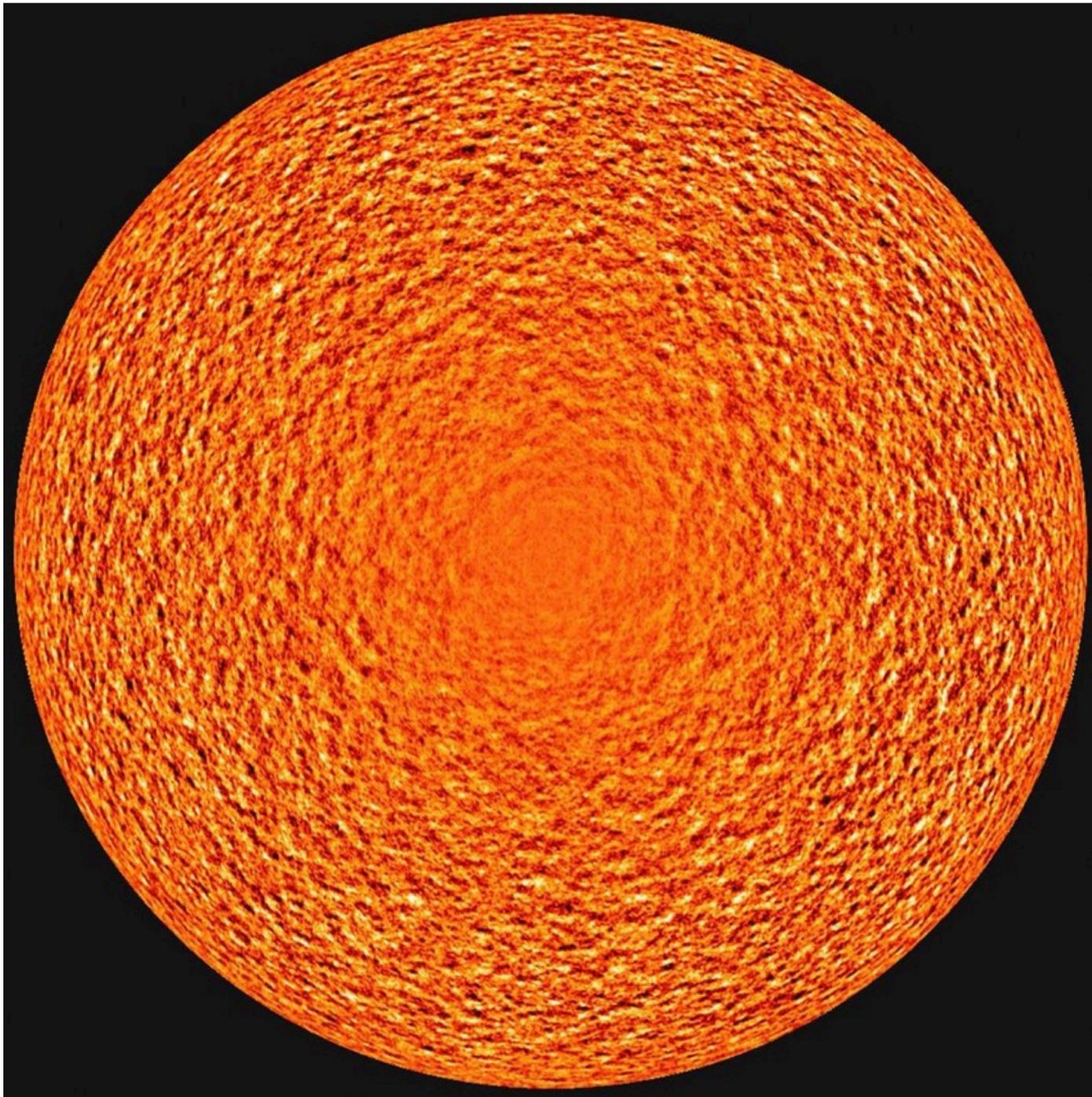


Image Sol'Ex pour la même date

L'observation de la supergranulation avec Sol'Ex

Vitesse horizontale des structures : 400 m/s - Durée de vie : 1 à 2 jours



Credit SOHO/MDI/ESA

See F. Rincon, M. Rieutord, Living Reviews in Solar Physics (2018) 15:6

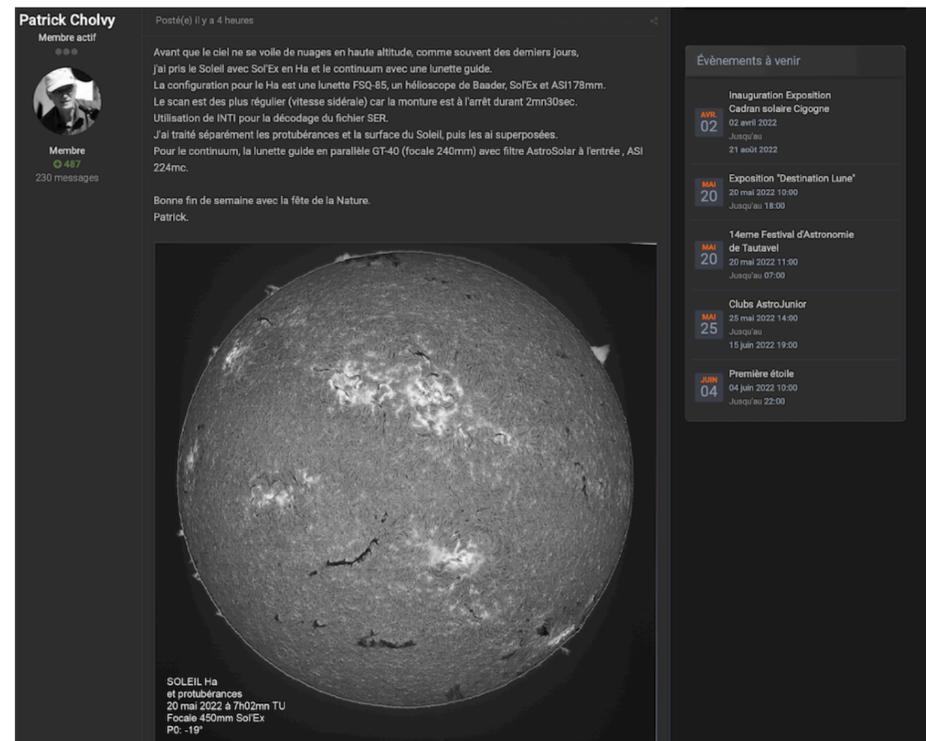
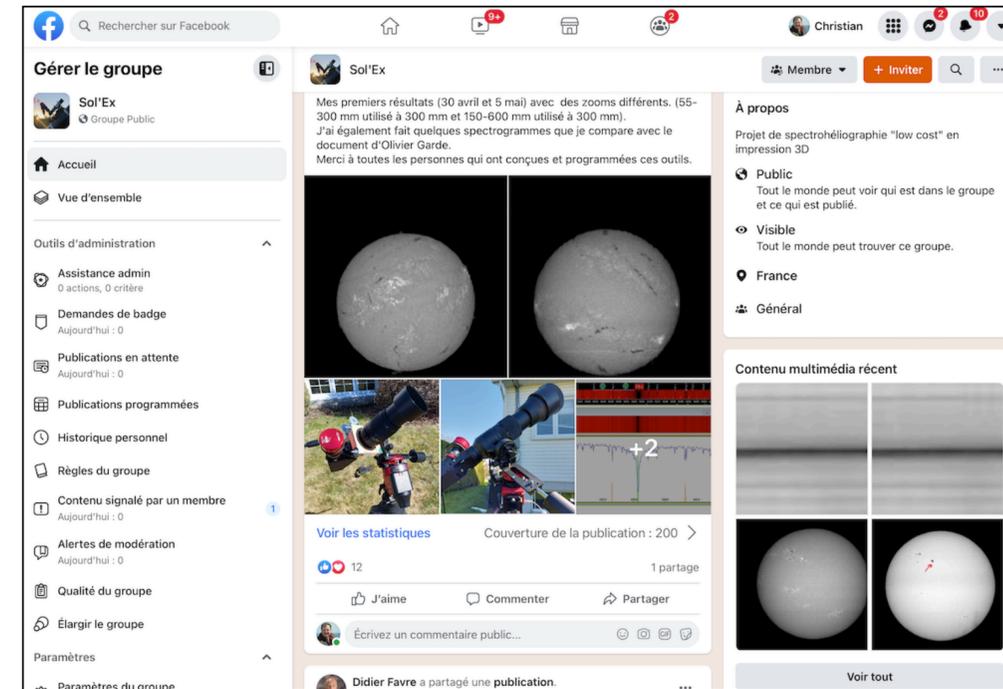
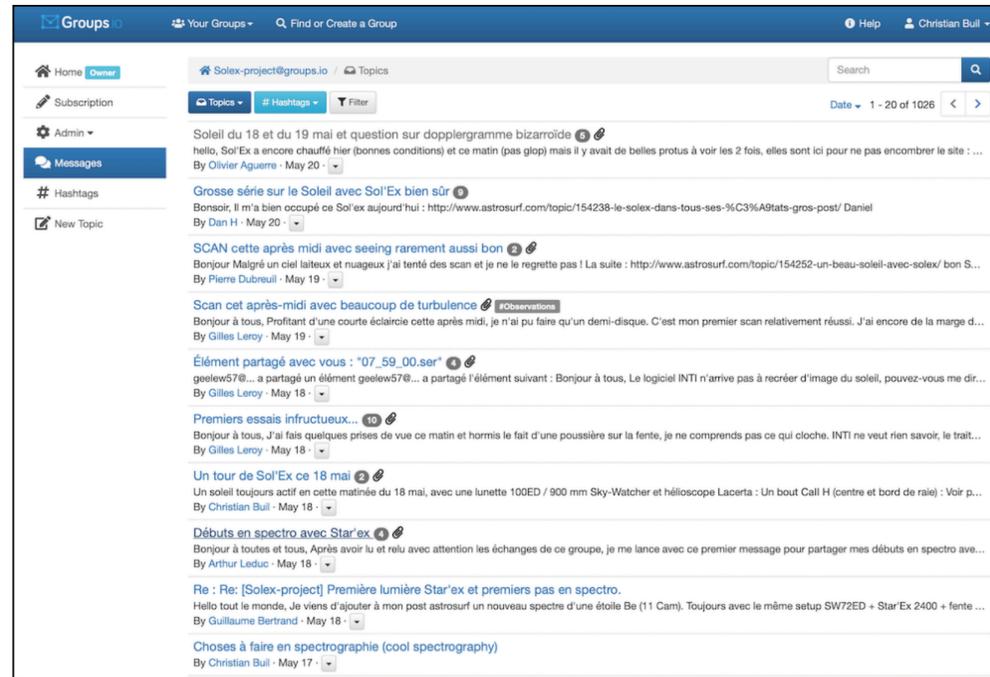
Sol'Ex on a 72 mm refractor

05/04/2022 - Christian Buil - Antibes

Sol'Ex : une aventure largement partagée

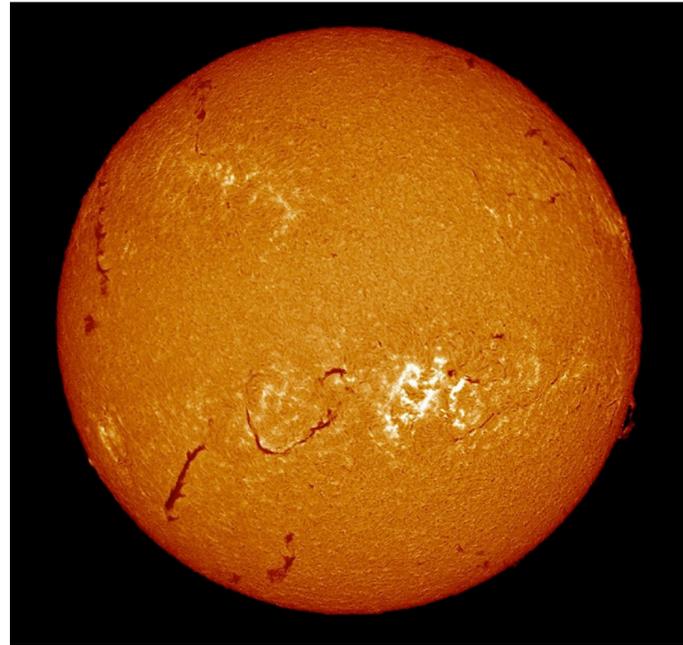
(plus de 300 exemplaires diffusés en un an et raisonnement internationale)

Projets de base de données, d'un réseau d'alerte, d'un suivi 24h/24h, de collaborations pro-am...

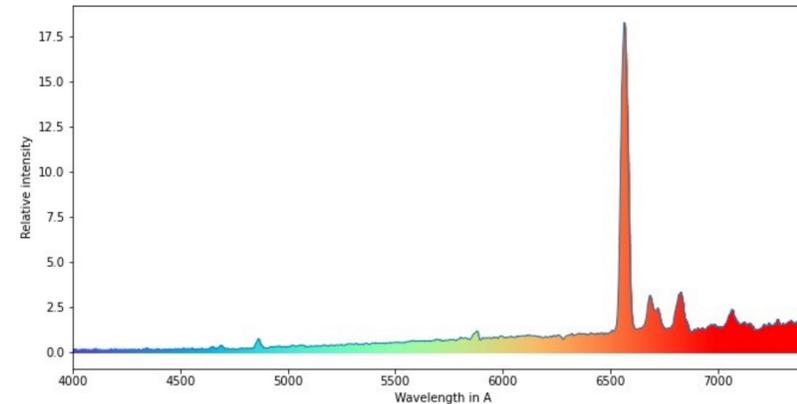
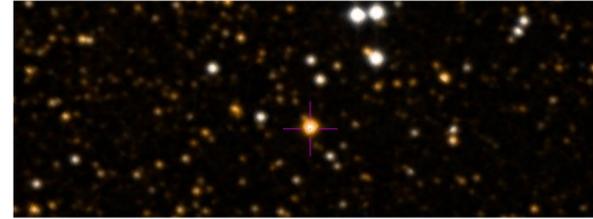


Mais encore...

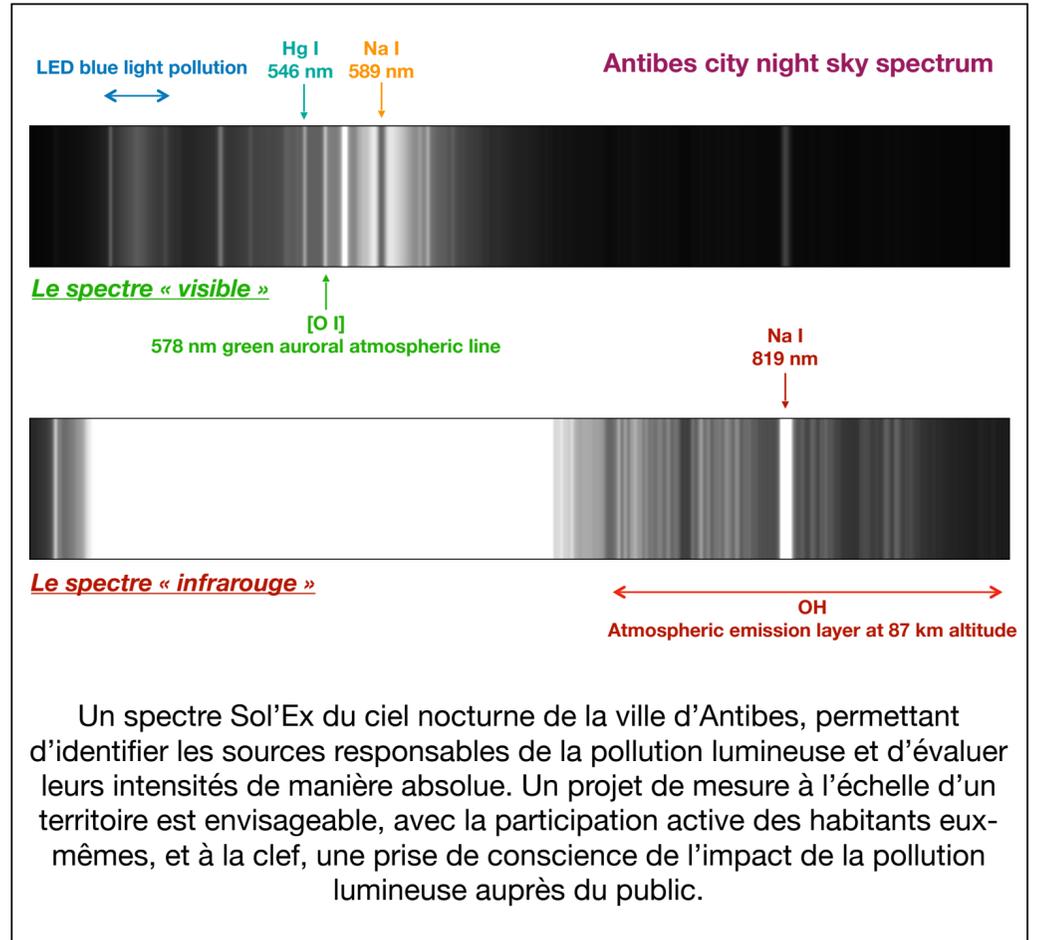
Sol'Ex peut être aisément convertie en un spectrographe astronomique très performant, souple, simple d'utilisation, et de faible coût, avec une foule d'applications possibles. C'est l'extension Star'Ex de Sol'Ex !



Une image du Soleil obtenue avec Sol'Ex associé une petite lunette astronomique dans la lumière de la raie rouge de l'hydrogène. D'autres raies peuvent être choisies, avec en plus la possibilité de mesurer la vitesse des protubérances et même la force du champ magnétique solaire !



A partir de la version « étoile » de Sol'Ex (configuration Star'Ex), une image du micro quasar SS433 réalisée avec un modeste télescope de 20 cm depuis son jardin, un objet astronomique qui abrite un trou noir responsable d'un jet de matière atteignant 25% de la vitesse de la lumière que l'on voit évoluer de jour en jour.



Pour en savoir plus sur le projet Sol'Ex / Star'Ex : <http://www.astrosurf.com/solex/>

Merci pour votre attention !



<http://www.astrosurf.com/solex/>