



HAL
open science

Sol'Ex et l'imagerie monochromatique solaire

Christian Buil, Jean-Marie Malherbe, Milan Maksimovic

► **To cite this version:**

Christian Buil, Jean-Marie Malherbe, Milan Maksimovic. Sol'Ex et l'imagerie monochromatique solaire. Photoniques, A paraître. hal-04097987

HAL Id: hal-04097987

<https://cnrs.hal.science/hal-04097987v1>

Submitted on 15 May 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Sol'Ex et l'imagerie monochromatique solaire

Ch. Buil (1), J.-M. Malherbe (2), M. Maksimovic (2)

(1) Association AUDE, ex-expert sénior en instrumentation optique au CNES, France

(2) Observatoire de Paris, Université de Recherche PSL, CNRS, LESIA, Meudon, France

Résumé

Nous présentons dans cet article le projet Solar Explorer « Sol'Ex », un spectrohéliographe miniaturisé pour astronome amateur permettant de réaliser par balayage des images monochromatiques de l'atmosphère solaire, de qualité professionnelle. Nous montrons comment un tel instrument s'insère dans une collaboration « pro/am » fructueuse, permettant d'enrichir une base nationale de données solaires construite autour du spectrohéliographe centenaire de Meudon.

Mots clef

Spectrohéliographe, SOLEX, Soleil, spectroscopie, photosphère, chromosphère

1. Historique des observations solaires à Meudon

Les observations à large bande de la photosphère solaire ont commencé à Meudon en 1875 sous les auspices de Jules Janssen. De son côté, Henri Deslandres a développé l'imagerie spectroscopique dès 1893 à l'observatoire de Paris. Il a inventé, en même temps que George Hale aux USA, mais de manière indépendante, le spectrohéliographe conçu pour l'imagerie monochromatique de l'atmosphère solaire (voir note). Deslandres s'installa à Meudon en 1898 avec ses instruments et testa diverses combinaisons, afin d'améliorer les performances, le conduisant au grand spectrohéliographe de 1908. Les observations systématiques en Call K ont commencé à cette date et ont été suivies par H α . Le service fut organisé par Lucien d'Azambuja et se poursuit aujourd'hui. L'instrument photographique a été refait en 1989 et la technologie numérique fut introduite en 2002. Les profils complets des raies sont désormais enregistrés en chaque point du Soleil.

2. Collection des données de Meudon

La collection meudonnaise d'images monochromatiques est l'une des plus longues disponibles (plus de 100000 images). Elle contient des observations sporadiques de 1893 à 1907 (obtenues pendant la phase de développement) et des observations systématiques pendant 10 cycles solaires depuis 1908, dans les raies H α (activité solaire) et Call K (K3 pour la chromosphère et K1V pour la photosphère). Les données photographiques ont été digitalisées et une base (BASS2000, <https://bass2000.obspm.fr>) a été créée en 1995. Les images sont en ligne en FITS à partir de 1980, mais avant la collection est en JPEG et en

cours de re-numérisation. BASS2000 est ouverte, en libre accès, et dispose d'une visibilité mondiale.

3. Le dispositif d'observation actuel à Meudon

Le spectrohéliographe (figure 1) a été conçu à l'époque des plaques de verre 13 x 18 cm² pour des grandes images de 86 mm de diamètre. C'est un instrument fixe, dans un laboratoire éclairé par un coélostate à deux miroirs. L'objectif d'entrée a 4.0 m de focale ; le collimateur 1.3 m et les deux chambres photo 3.0 m de focale. Le balayage du Soleil se fait en translatant l'objectif d'entrée. Les plaques photo étaient synchronisées et se déplaçaient devant une fente sélectrice de 75 μ placée dans le spectre.

Une chambre numérique a été créée lorsque les détecteurs CCD/CMOS sont apparus, bien plus courte (0.9 m puis 0.4 m), et la fente sélectrice supprimée, de sorte que l'on enregistre désormais des cubes de données (x, y, λ). Certaines tranches de ces cubes constituent les images classiques. Le spectrographe fonctionne avec un réseau fixe dans les ordres 3 (H α) et 5 (Call H et K, observées simultanément).

4. L'instrument Sol'Ex, sa justification

Tout comme l'instrument de Meudon, Sol'Ex, contraction de l'anglais "Solar Explorer", est un équipement dont le but, en association avec une lunette astronomique, consiste à délivrer une image de l'atmosphère du Soleil. Mais la spécificité de Sol'Ex est de permettre cette observation avec un instrument très compact, simple d'utilisation et idéal pour des expériences pédagogiques, tout en affichant des performances de haut niveau compatibles avec un programme de recherche scientifique. Il s'adresse avant tout à des astronomes amateurs, mais comme on va le voir, il trouve aussi sa place pour des utilisations scientifiques professionnelles.

A la base, Sol'Ex est un spectrographe à réseau de diffraction offrant une haute résolution spectrale. Le pouvoir de résolution, rapport entre la longueur d'onde de travail et le plus fin détail spectral discernable, est d'environ 40 000. Cette performance est nécessaire pour détailler le cœur des raies spectrales, comme celle de l'hydrogène à 656 nanomètres, formées par des atomes qui absorbent la lumière provenant de l'atmosphère du Soleil (Figure 2). Elle confère des images à très haut contraste de l'atmosphère solaire.

Tout l'enjeu du projet est revenu à obtenir cette performance avec un instrument de petit coût de revient, pesant moins de 350 grammes, caméra d'acquisition comprise, et tenant dans la main (Figure 3). Cette miniaturisation est garante d'un usage de Sol'Ex sur des instruments de prise de vue eux-mêmes compacts et maniables, largement diffusés auprès du public, avec une bonne répartition géographique qui améliore la couverture temporelle d'observation du Soleil en gommant les contraintes météorologiques.

En plus de la performance, le projet est caractérisé par son ambition éducative. Grâce à l'impression 3D, l'utilisateur monte et règle lui-même son instrument. Un kit optique spécialement optimisé est par ailleurs disponible à un prix étudié. A cela, il faut ajouter une large documentation et une communication efficace à travers les réseaux sociaux. Le pari

est de démystifier un objet technologique optique relativement complexe auprès d'un public a priori non préparé. Le pari se révèle gagnant puisque des centaines de spectrohélographes Sol'Ex sont aujourd'hui construits et utilisés, avec une diffusion qui dépasse les frontières de la France et de l'Europe (États-Unis, Australie, Indonésie... et même Chine). On retrouve Sol'Ex dans les clubs d'astronomie, mais aussi dans le milieu scolaire et étudiant car le système est en soi un parcours pédagogique couvrant des domaines aussi divers que la physique, les mathématiques, la mécanique, la CAO, l'optique appliquée, la métrologie, l'informatique et la programmation.

La conception ayant été prévue dès le départ comme évolutive, il existe aujourd'hui de nombreuses déclinaisons de Sol'Ex, multipliant les possibilités : Star'Ex (Star Explorer), un spectrographe pour sources faibles, comme les étoiles et les galaxies ; Pol'Ex (Pollution Explorer), une version avec son logiciel permettant de mesurer le spectre du ciel nocturne et l'impact de la pollution lumineuse ; Lab'Ex (Laboratory Explorer), une déclinaison adaptée à des mesures de laboratoire diverses (transmission de filtres ou de substances, fluorescence, etc...).

5. L'intérieur de Sol'Ex

Sol'Ex est un spectrographe de facture très classique. La lumière rencontre dans l'ordre une fente étroite, un objectif collimateur, un réseau à diffraction, un objectif de caméra et un détecteur. Voyons quelques spécificités.

L'image du disque solaire, atténuée en intensité par une densité neutre située à l'avant de la lunette de prise de vue, est focalisée sur une fente de 10 microns de large réalisée selon une technique photolithographique dans une couche de chrome déposée sur l'une des faces d'une fine lame de verre. Cette fente assure à la fois la fonction d'échantillonnage par tranche de l'image du disque solaire lorsqu'elle défile devant elle, et fixe la résolution spectrale du spectrographe.

Les objectifs collimateurs et de caméras sont de simples doublets, mais spécialement optimisés et fabriqués sur mesure. La distance focale de l'objectif collimateur est de 80 mm, alors que celle de l'objectif de la caméra est de 125 mm. Ce choix d'une focale d'objectif de caméra plus longue que celle du collimateur pour les observations solaires est peu habituel. Il permet ici l'échantillonnage de l'image du spectre en respectant le critère de Shannon en relation avec la finesse de la fente d'entrée.

Le réseau est un modèle d'holographie de 2400 traits par millimètre, assurant le pouvoir dispersif nécessaire. Le jeu d'angles d'incidence et de diffraction (respectivement $72,4^\circ$ et $38,4^\circ$ à la longueur d'onde de 656 nanomètres) génère une anamorphose élevée (environ 0,39) qui est l'une des clés du concept en délivrant une image de la fente bien plus étroite dans le plan du détecteur qu'elle ne l'est physiquement à l'entrée, d'où la haute résolution spectrale.

La fente, l'objectif de caméra et le réseau sont aisément interchangeables, une caractéristique à l'origine de la flexibilité d'utilisation du système.

Un autre élément clé de l'instrument est le bénéfice que l'on tire des détecteurs CMOS à petits pixels pour concevoir des instruments compacts. Cette catégorie de capteur est par ailleurs dotée d'une fréquence d'image si élevée qu'elle rend facile et performante la prise de vue à la volée d'un disque solaire défilant sur la fente d'entrée, à la manière d'un scanner. Le capteur type pour cette application est le modèle Sony IMX178.

L'ensemble mécanique est constitué de pièces mécaniques de taille restreinte et facilement imprimables en 3D en une ou deux journées. Le matériau recommandé pour l'impression est le PET-G, très courant, qui se révèle avoir deux propriétés intéressantes pour nous : une bonne tenue mécanique sur la durée et une bonne opacité à la lumière lorsque le fil d'impression est choisi en noir mat.

Des applications Python dédiées ont par ailleurs été développées pour le traitement des « scans » solaire (logiciel INTI) et des données spectrales en général (logiciel specINTI).

Les figures 4 et 5 donnent des exemples de spectres obtenus avec Sol'Ex, tandis que les figures 6 et 7 dévoilent quelques images monochromatiques résultant du traitement de séries de spectres H α obtenus par « scan » de la surface solaire, démontrant ainsi la qualité professionnelle du travail fait avec Sol'Ex.

6. Apport des amateurs pour compléter BASS2000 grâce à Sol'Ex

Sol'ex est donc un spectrohéliographe miniaturisé grâce aux nouvelles technologies ; la qualité des images monochromatiques qu'il produit lui donne toute sa place à côté de l'instrument de Meudon. Grâce à sa large diffusion et la contribution de nombreux amateurs répartis en France ou à l'étranger, il va être possible de disposer d'observations tous les jours, et plusieurs fois par jour. Cette continuité est exceptionnelle et n'existe qu'au sein du réseau GONG, qui est constitué d'instruments moins contrastés, utilisant des filtres. C'est un sérieux plus pour les modélisateurs qui travaillent sur les cycles solaires et ont besoin de données homogènes. Les observations concernent la raie H α mais aussi Call H et K, qui constituent des excellents « proxys » pour les reconstructions d'irradiance à long terme.

NOTE

L'atmosphère solaire est composée de trois couches : (1) la photosphère (surface visible, température diminuant de 6000 à 4500 degrés en 300 km) avec des zones magnétisées (taches sombres et facules brillantes), (2) la chromosphère au-dessus (température augmentant de 4500 à 8000 degrés en 2000 km) avec des filaments et protubérances, (3) la couronne ionisée et chaude (2 millions de degrés). La chromosphère nécessite des moyens spectroscopiques pour dévoiler ses structures, via des raies d'absorption comme H α (disque) ou des raies d'émission (limbe). L'atmosphère solaire suit un cycle d'activité de 11 ans. Les éruptions et les éjections de matière se produisent dans les régions actives autour du maximum solaire, le prochain est prévu pour 2025.

REFERENCES

C. Buil, le site Sol'Ex : <http://www.astrosurf.com/solex/>

C. Buil, le site du logiciel specINTI : http://www.astrosurf.com/solex/specinti1_fr.html

V. Desnoux, le site du logiciel INTI : <http://valerie.desnoux.free.fr/inti/>

J.-M. Malherbe, I. Bualé, F. Cornu, D. Crussaire and T. Corbard, "The potential of Meudon spectroheliograph for investigation long term solar activity and variability", *Advances in Space Research*, 2023b, 71, 1922, on-line at <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.07.058>

J.-M. Malherbe, "130 years of spectroheliograms at Paris-Meudon observatories (1892-2022)", 2023a, on-line at <https://arxiv.org/abs/2301.11105>

ANNEXE : CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DE Sol'Ex

Tableau comparatif des principales caractéristiques optiques des spectrohéliographes SOLEX et de celui de Meudon. Les figures 8 et 9 complètent l'information technique sur Sol'Ex (dispersion et rayon de courbure des raies, résolution spectrale, en fonction de la longueur d'onde)

	SOL'EX	Meudon	Remarques
Résolution spectrale	0.16 Å	0.25 Å	H α
Résolution spectrale	0.36 Å	0.15 Å	CaII H/K
Largeur fente	10 μ	30 μ	
Hauteur fente	4.5 mm	45 mm	
Rayon de courbure des raies	6-13 cm	infini	Meudon: fente courbe
Réseau	2400 t/mm	300 t/mm	SOLEX: réseau rotatif
Ordre d'interférence	1	3 et 5	Meudon: réseau fixe
Sélection des ordres		filtres	
Collimateur (diamètre/focale)	0.025/0.080 m	0.13/1.3 m	
Chambre (diamètre/focale)	0.025/0.125 m	0.08/0.4 m	Meudon photo: 3.0 m

FIGURES



Figure 1. Spectrohéliographe de Meudon. C1 et C2 : anciennes chambres photographiques de 3.0 m pour Call K et H α . S : spectrographe (contient la chambre CCD de 0.4 m, le réseau et le collimateur de 1.3 m). H = spectrohélioscope visuel escamotable à prismes rotatifs. L = porte lune de densité 1 couplé à l'objectif. F : fente du spectrographe (soleil de 37.2 mm).

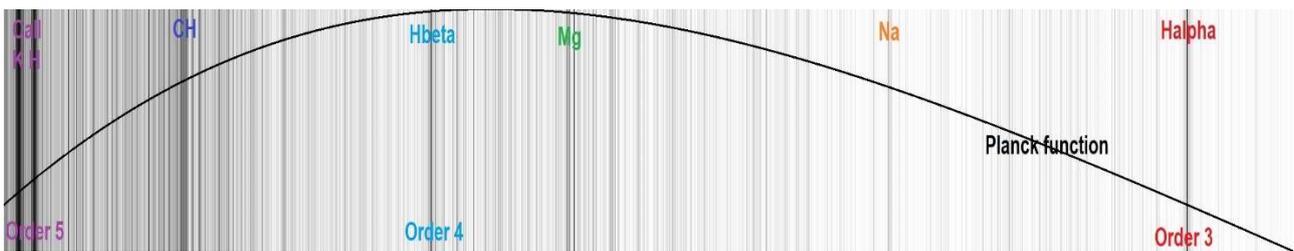


Figure 2. Spectre montrant les raies les plus aisément observables avec Sol'Ex. Toutes les raies de Fraunhofer (Call H, K violettes, série de Balmer de l'Hydrogène, Sodium D1 et D2, Helium D3, triplet du magnésium) sont observables, et bien d'autres raies photosphériques, comme celles du fer, sensibles à l'effet Zeeman qui est mesurable avec Sol'Ex en y adjoignant un analyseur de polarisation circulaire. Le spectrohéliographe de Meudon ne permet d'observer que dans les ordres 3, 4 et 5 indiqués.

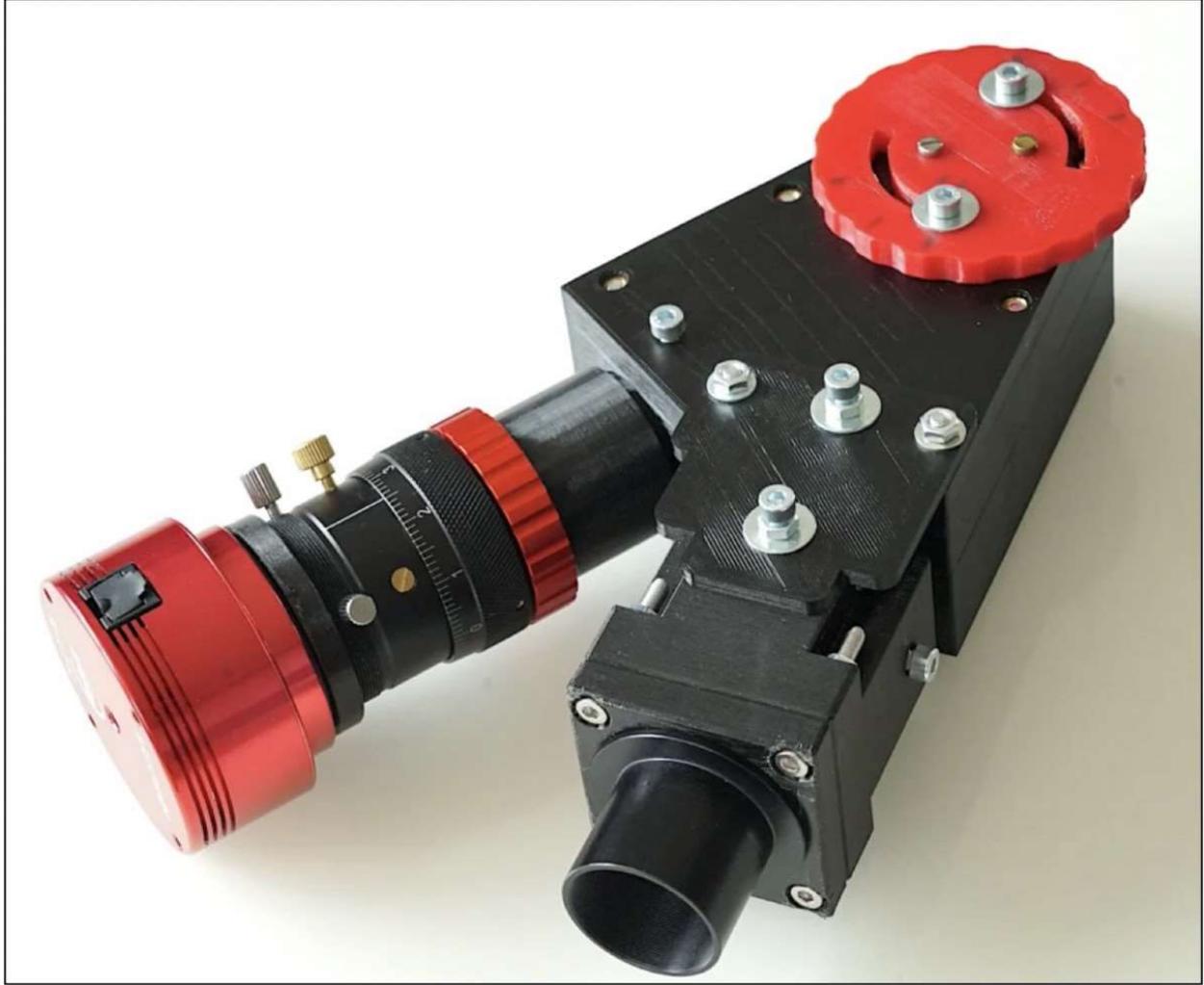


Figure 3. *Vue de l'instrument Sol'Ex. On aperçoit en bas à gauche l'interface vers une lunette ou un télescope astronomique. La manette de couleur rouge permet d'orienter le réseau à diffraction et sélectionner ainsi la longueur d'onde de travail. La caméra est un modèle CMOS d'origine ZWO.*

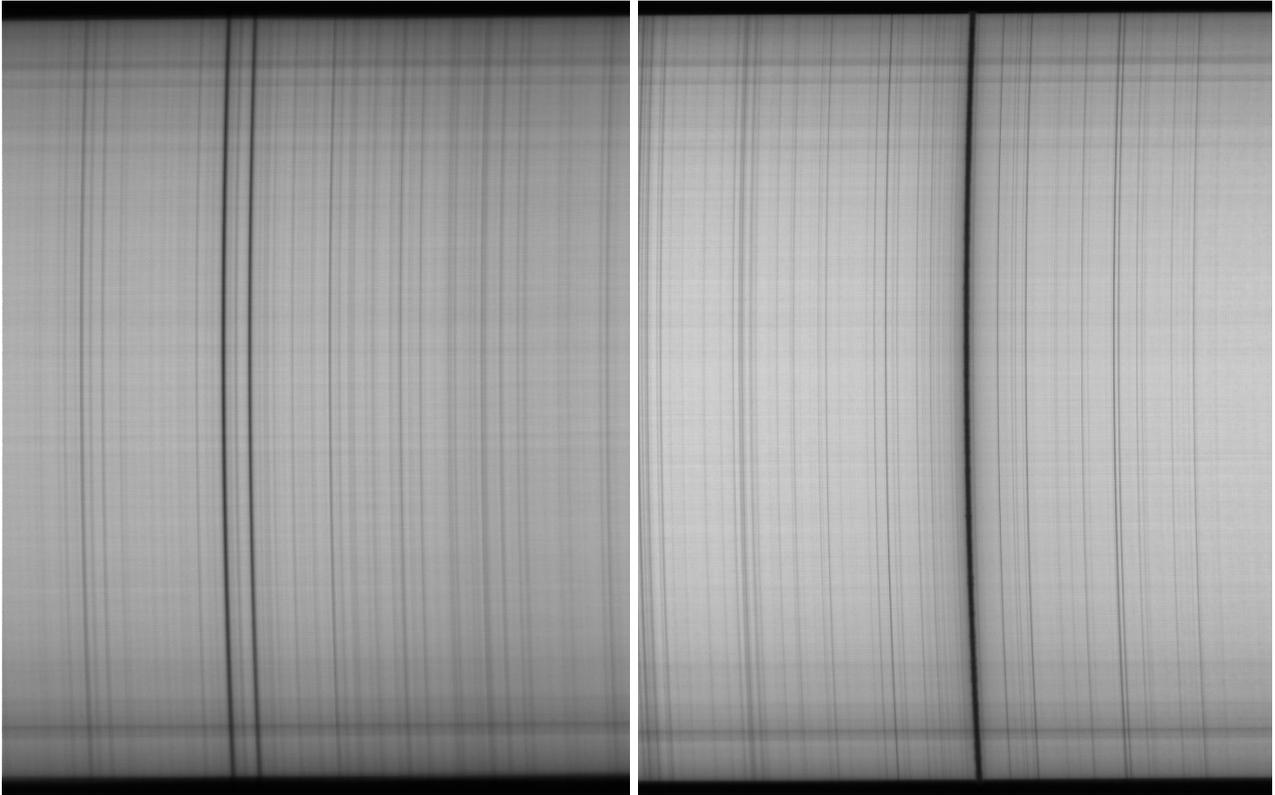


Figure 4. Exemple de spectres obtenus avec Sol'Ex : Sodium D2 (5890 Å) et D1 (5896 Å), H α (6563 Å). Longueur d'onde = axe X. La fente (axe Y) couvre ici la totalité du diamètre solaire.

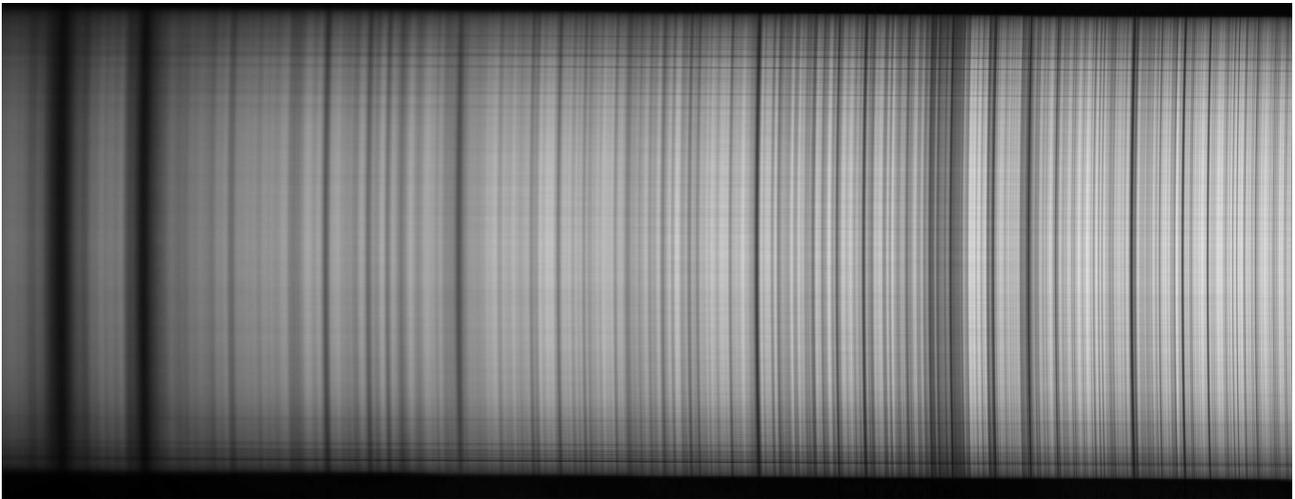


Figure 5. Exemple de spectres obtenus avec Sol'Ex : CaII K (3934 Å) et H (3968 Å), H δ (4101 Å), CaI (4227 Å), bande moléculaire CH (4305 Å), deux raies du FeI, H γ (4340 Å). Longueur d'onde = axe X. La fente (axe Y) couvre ici la totalité du diamètre solaire.

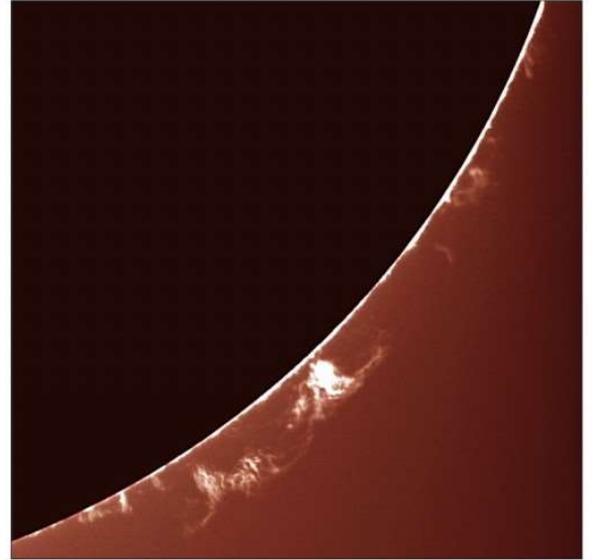
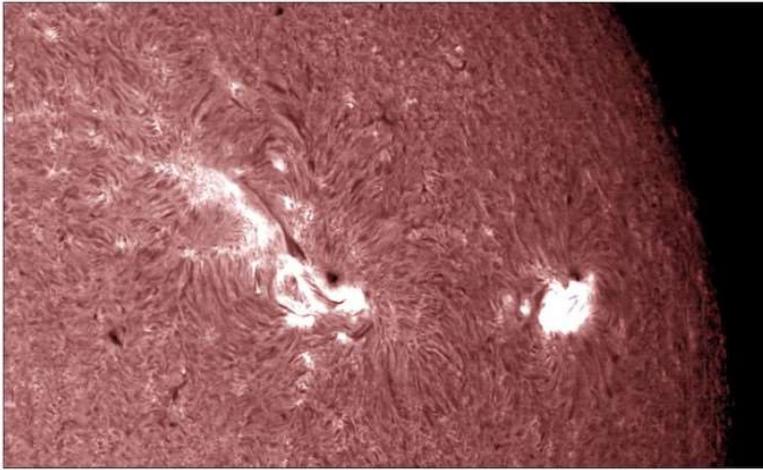


Figure 6. Extraits caractéristiques d'images de la chromosphère obtenues grâce Sol'Ex et une lunette de astronomique de 100 mm de diamètre, révélant des taches solaires, des filaments, des éruptions et des protubérances au limbe.

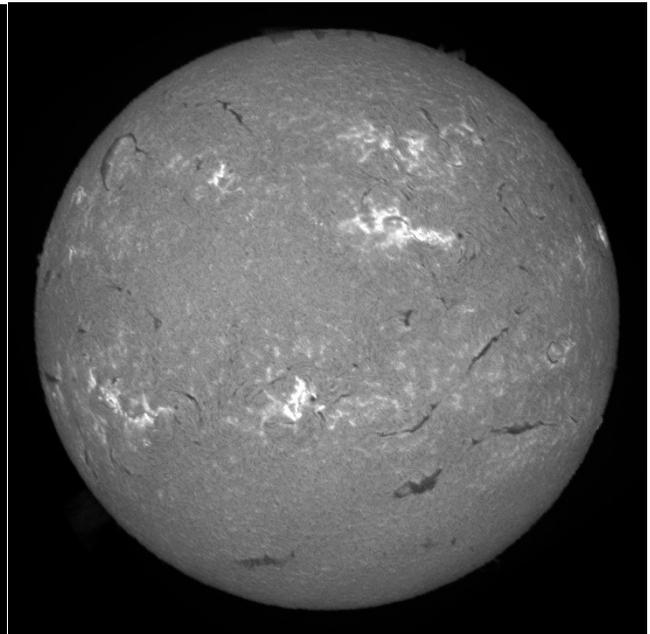
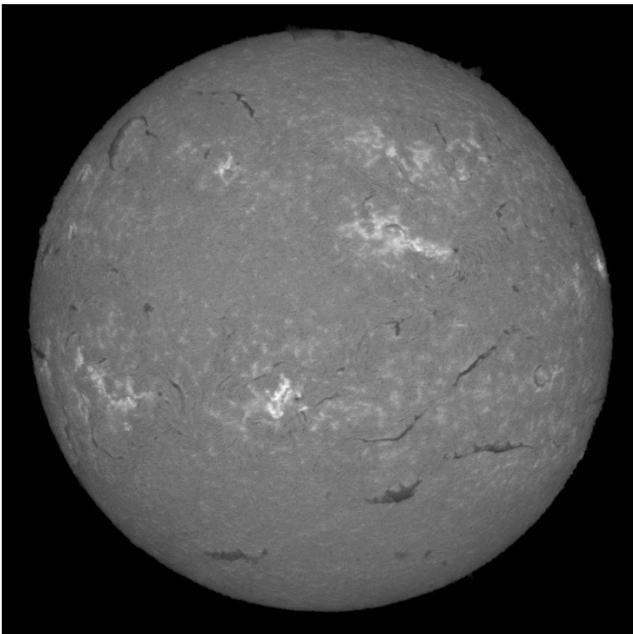


Figure 7. Observations du 9 Mars 2023. Chromosphère solaire, raie H α . SOLEX à gauche, spectrohéliographe de Meudon à droite.

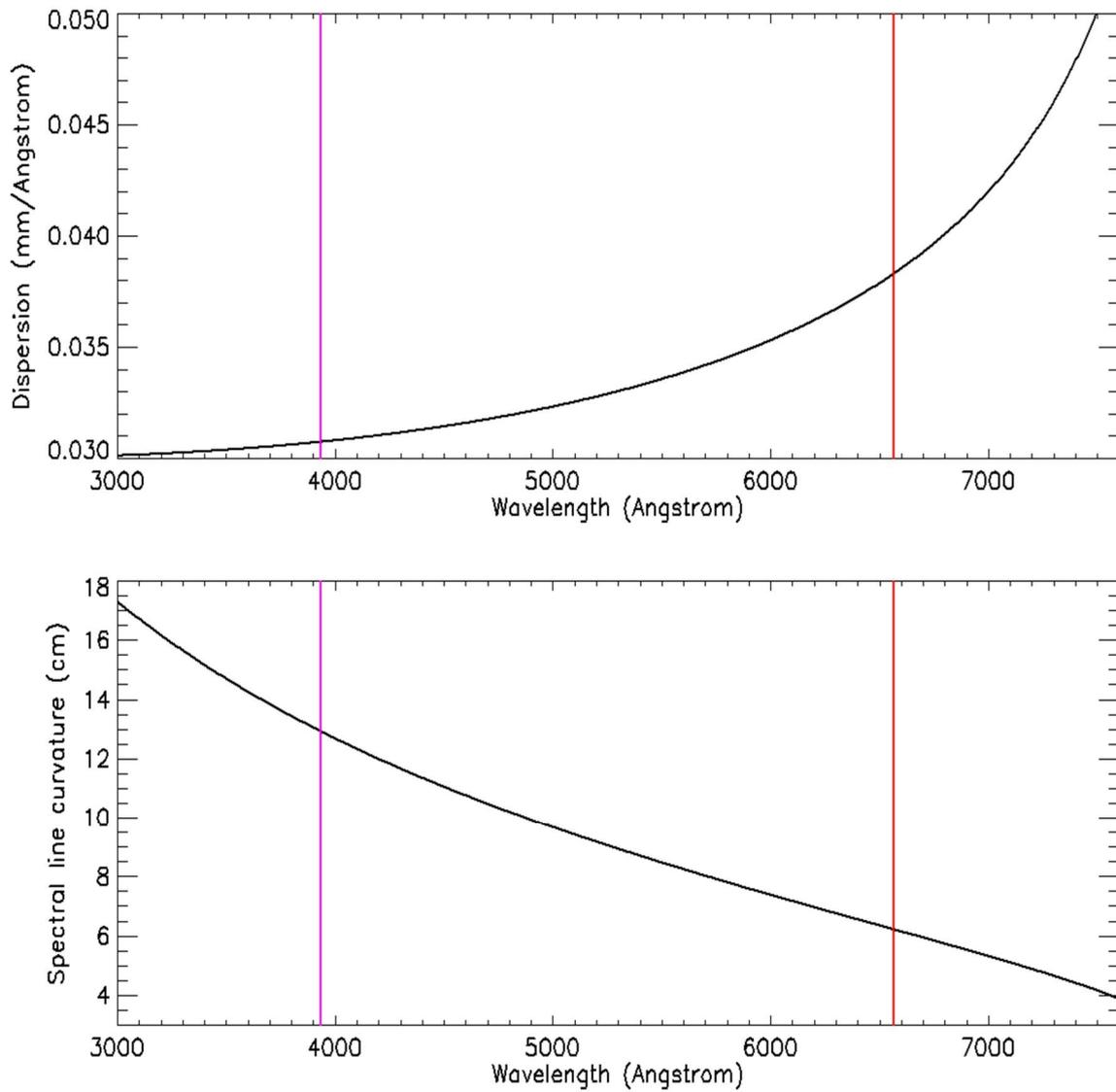


Figure 8. Dispersion de Sol'Ex en mm/Angström (en haut) et rayon de courbure des raies en cm (en bas), en fonction de la longueur d'onde d'observation. Les raies sont courbes sur le détecteur et la courbure est corrigée par le programme de traitement INTI. La position des raies Call K et H α est indiquée par les barres (violette et rouge).

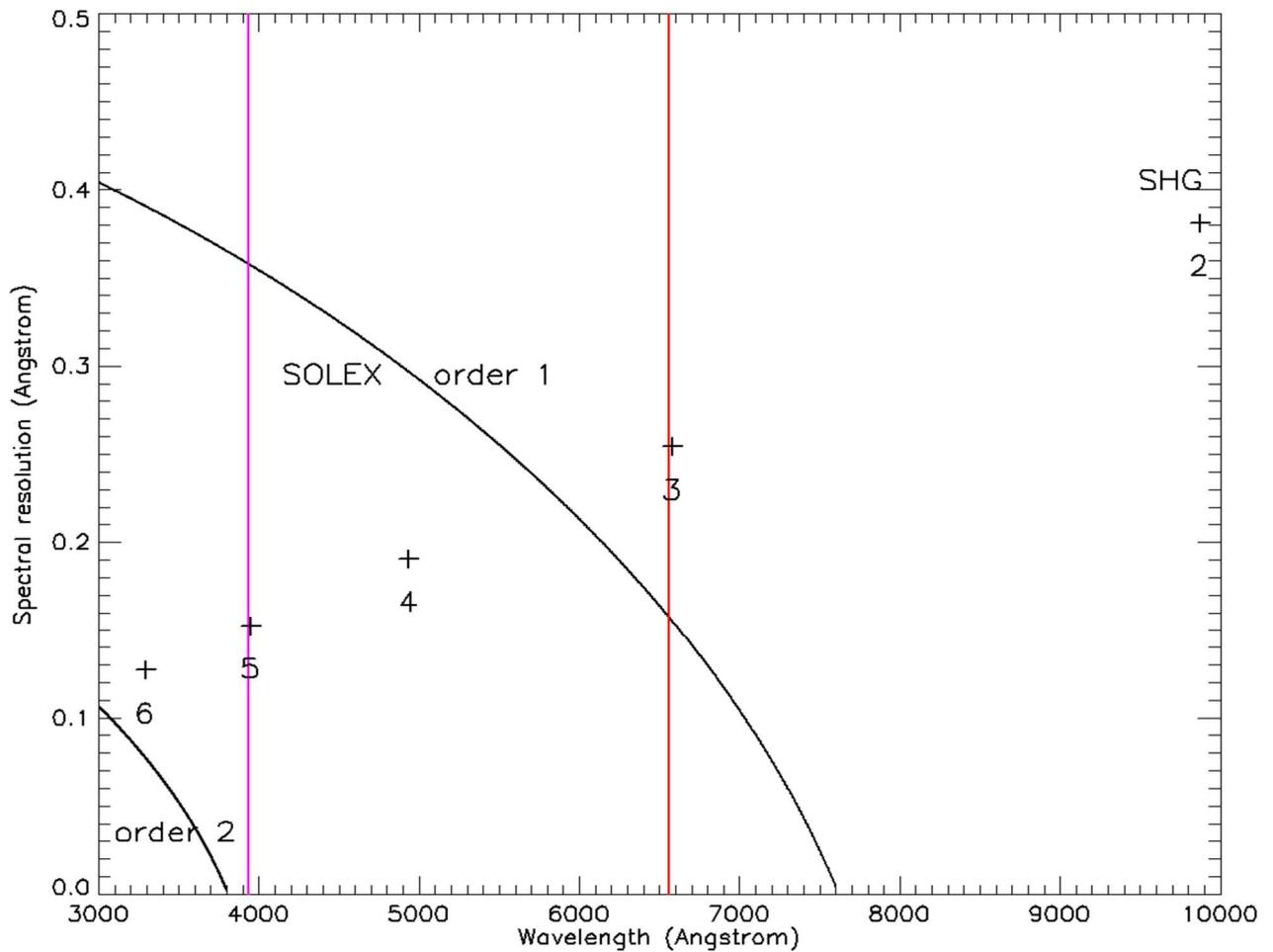


Figure 9. Résolution spectrale de Sol'Ex en Angström et comparaison avec le spectrohéliographe de Meudon fonctionnant dans les ordres 3 et 5 (2 à 6 représentés). Les comportements sont différents : pour Sol'Ex, la résolution se dégrade vers le bleu, pour Meudon elle se dégrade vers le rouge. Les résolutions spectrales des deux instruments sont dans le même ordre de grandeur, dans la gamme 0.15 - 0.30 Å. La position des raies Call K et H α est indiquée par les barres (violette et rouge).