

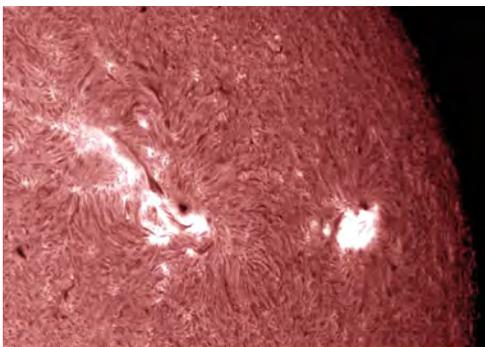
# Sol'Ex et l'imagerie monochromatique solaire

**Christian BUIL<sup>1,\*</sup>, Jean-Marie MALHERBE<sup>2</sup>, Milan MAKSIMOVIC<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Association AUDE, ex-expert sénior en instrumentation optique au CNES, France

<sup>2</sup> Observatoire de Paris, Université de Recherche PSL, CNRS, LESIA, Meudon, France

\*christian.buil@wanadoo.fr



**Après une brève présentation des observations solaires réalisées depuis très longtemps à l'observatoire de Meudon et de leur enjeu, cet article décrit un modèle de spectrohéliographe extrêmement compact, capable de compléter la vaste collection de données historiques par des images actuelles, de haute valeur scientifique, ayant la caractéristique d'être acquises par un large public.**

<https://doi.org/10.1051/photon/202312036>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

**A**près une brève présentation des observations solaires réalisées depuis très longtemps à l'observatoire de Meudon et de leur enjeu, cet article décrit un modèle de spectrohéliographe extrêmement compact, capable de compléter la vaste collection de données historiques par des images actuelles, de haute valeur scientifique, ayant la caractéristique d'être acquises par un large public.

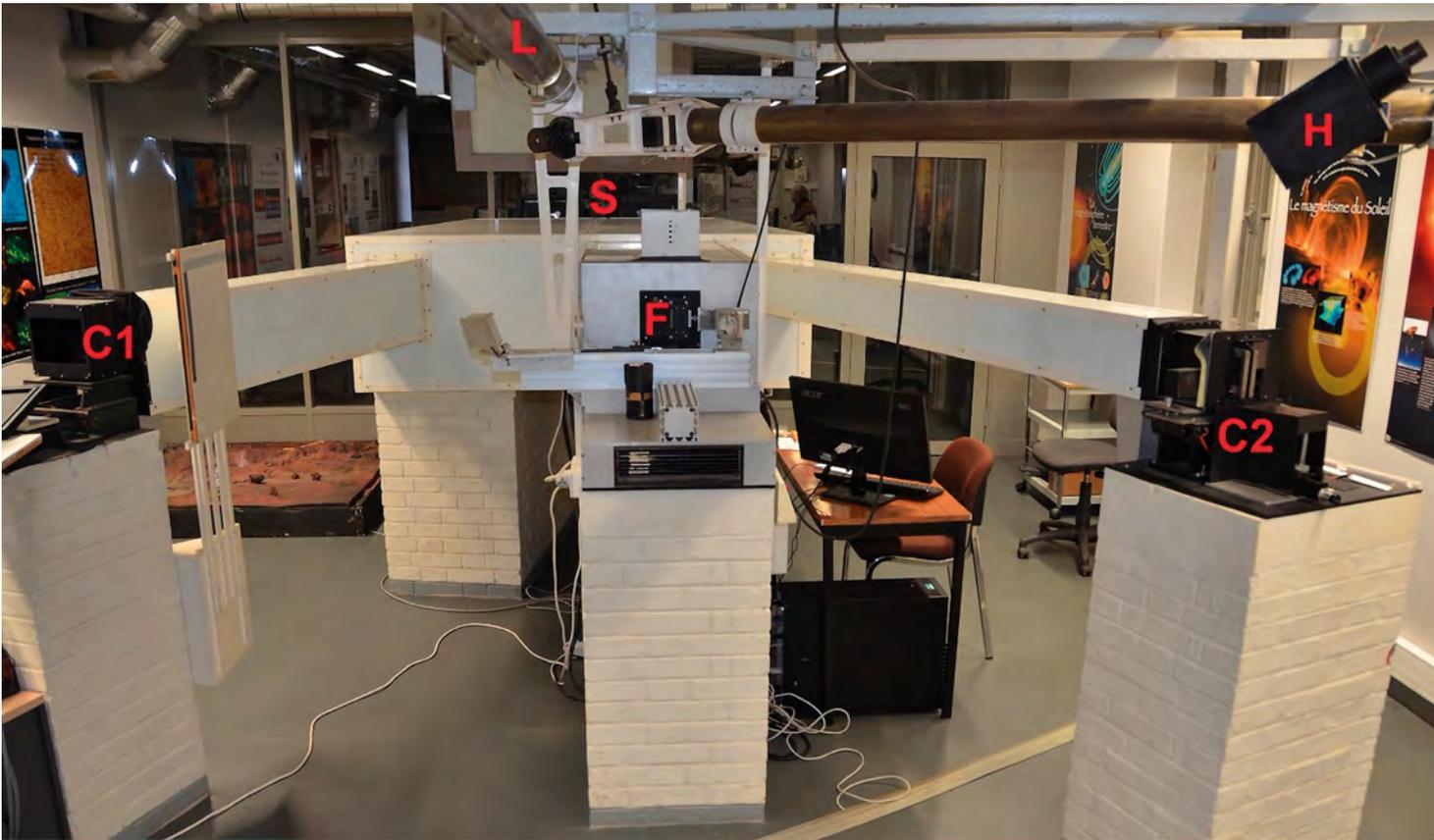
## Historique des observations solaires à Meudon

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 encart). 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

**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 $\alpha$  (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.



**Figure 1 :** Spectrohéliographe de Meudon. C1 et C2 : anciennes chambres photographiques de 3.0 m pour CaII K et H $\alpha$ . 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). Crédit observatoire de Paris.

1908. Les observations systématiques en CaIIK ont commencé à cette date et ont été suivies par H $\alpha$ . 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.

## Collection des données de Meudon

La collection meudonnaise d'images monochromatiques est l'une des plus longues disponible (plus de 100000 images). Elle contient des observations sporadiques de 1893 à 1907 (obtenues pendant la phase de développement)

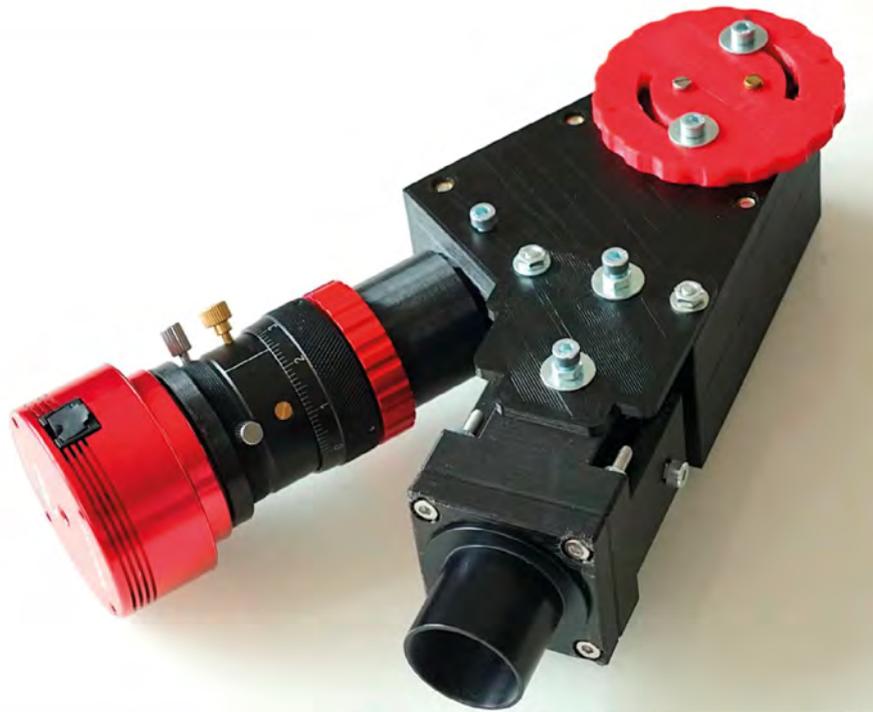
et des observations systématiques pendant 10 cycles solaires depuis 1908, dans les raies H $\alpha$  (activité solaire) et CaII K (K3 pour la chromosphère et K1V pour la photosphère). Les données photographiques ont été digitalisées et une base (BASS2000, <https://bass2000.obspm.fr>) a été créée en 1995. BASS2000 est ouverte en libre accès et dispose d'une visibilité mondiale.

## Le dispositif d'observation actuel à Meudon

Le spectrohéliographe a été conçu à l'époque des plaques de verre 13 x 18 cm<sup>2</sup> 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 déplaçant l'objectif d'entrée. Les plaques photo étaient synchronisées et se déplaçaient devant une fente sélectrice de 75  $\mu$ m placée dans le spectre.

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



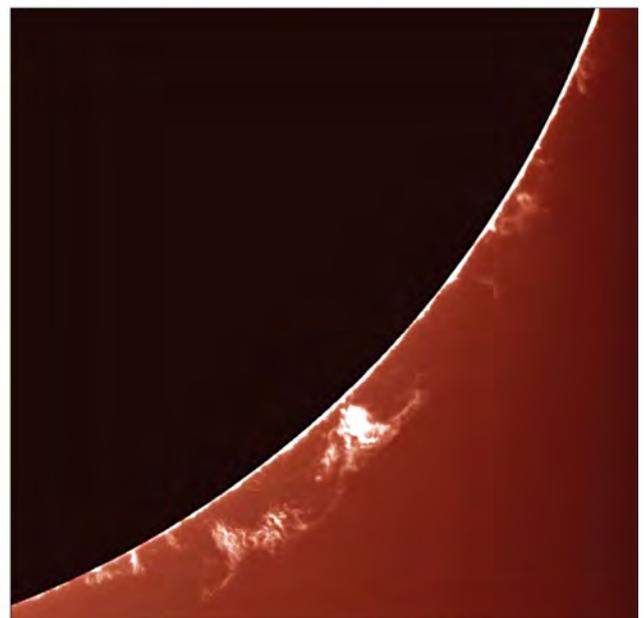
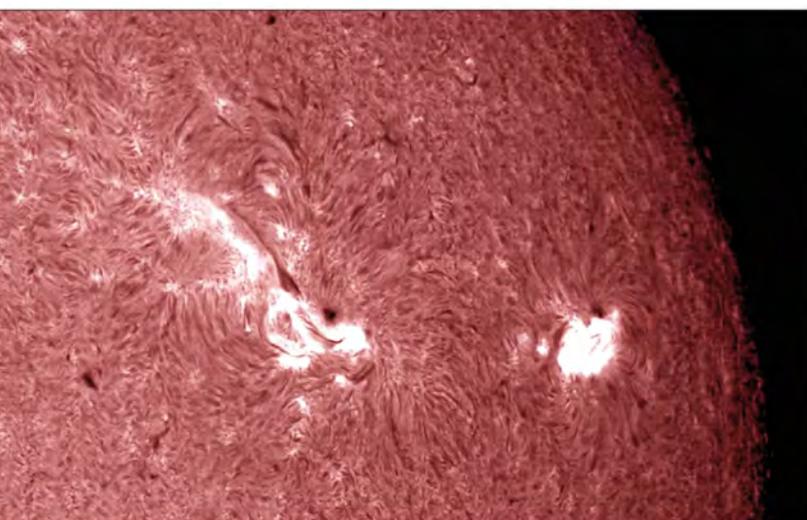
**Figure 2 :** Vue de l'instrument Sol'Ex. On aperçoit en bas à gauche l'interface vers une lunette ou un télescope astronomique. La manette de couleur rouge permet d'orienter le réseau à diffraction et sélectionner ainsi la longueur d'onde de travail. La caméra est un modèle CMOS d'origine ZWO.

**Figure 3 :** Extraits caractéristiques d'images de la chromosphère obtenues grâce à 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.

## L'instrument Sol'Ex, 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 qui se veut 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.

À 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'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.

l'hydrogène à 656 nanomètres, l'endroit du spectre où est détectée la lumière provenant de l'atmosphère du Soleil. 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 à petit coût de revient, pesant moins de 350 grammes, caméra d'acquisition comprise, et tenant dans la main. 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. À 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 spectrohéliographes 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.).

### 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 de 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

## Du nouveau pour la mesure de surfaces optiques !

Pour résoudre les problématiques actuelles de métrologie optique en production, Imagine Optic commercialise MESO, une nouvelle solution de caractérisation de front d'onde et de surfaces planes. Que vous soyez fabricant ou intégrateur, MESO permet de contrôler la qualité optique de pièces pendant le process, en fin de ligne ou avant intégration.

Il est tout particulièrement adapté au test d'échantillons plans : filtres et dichroïques, cristaux, miroirs et substrats à faces parallèles.

L'instrument, comparable à un interféromètre de type Fizeau, a plus d'un atout dans sa poche. Sa technologie le rend intrinsèquement :

1/ peu sensible aux vibrations et turbulences atmosphériques grâce à une mesure 'flash' acquise en 30 us,  
2/ capable de mesurer en transmission ou réflexion à n'importe quelle longueur d'onde,

3/ compatible avec les réflexions parasites pouvant provenir de la surface arrière des échantillons, évitant d'avoir à les préparer pour les tester. ●

### CONTACT

Les ingénieurs d'application d'Imagine Optic seront ravis de compléter cette information et de tester vos échantillons :

contact@imagine-optic.com  
ou par téléphone : 01 64 86 16 60.

### Pour plus d'informations :

<https://www.imagine-optic.com/products/meso-metrology-system/>



MESO, nouvel outil pour la métrologie optique en production.

	SOLEX	Meudon SHG	Remarques
Résolution spectrale	0.16 Å	0.25 Å	H $\alpha$
Résolution spectrale	0.36 Å	0.15 Å	Call H/K
Largeur fente	10 $\mu$	30 $\mu$	
Hauteur fente	4.5 mm	45 mm	
Rayon de courbure des raies	6 - 13 cm	infini	SHG : fente courbe
Réseau	2400 t/mm	300 t/mm	SOLEX : réseau rotatif
Ordre d'interférence	1	3 et 5	SHG : 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	SHG photographique: 3.0 m

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° et 38,4° 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). L'accent a été mis pour offrir un maximum de souplesse (choix des longueurs d'onde d'observation) et un haut de degré d'automatisation qui facilite l'usage.

## 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 $\alpha$  mais aussi CaII K, qui est un excellent « proxy » pour les reconstructions d'irradiance à long terme. ●

## RÉFÉRENCES

- [1] J.-M. Malherbe, I. Bualé, F. Cornu, D. Crussaire and T. Corbard, *Adv. Space Res.* **71**, 1922 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.07.058>
- [2] J.-M. Malherbe, 130 years of spectroheliograms at Paris-Meudon observatories (1892-2022), *arXiv:2301.11105* (2023), <https://arxiv.org/abs/2301.11105>
- [3] C. Buil, le site Sol'Ex : <http://www.astrosurf.com/solex/>
- [4] V. Desnoux, le site du logiciel INTI : <http://valerie.desnoux.free.fr/inti/>
- [5] C. Buil, le site du logiciel specINTI : [http://www.astrosurf.com/solex/specinti1\\_fr.html](http://www.astrosurf.com/solex/specinti1_fr.html)