

Par Olivier Aguerre

La **couronne solaire** imagée avec un **Sol'Ex**

Le week-end des 22 et 23 juin je suis parti aux Rencontres des Observateurs Solaires (ROS) de Serbannes un peu chargé en matériel, avec la ferme intention de retenter l'imagerie de la couronne solaire avec le spectrohéliographe Sol'Ex développé par Christian Buil...

Christian avait déjà réalisé plusieurs tentatives au niveau de la mer à Antibes en 2022 et aux Journées de l'Astronomie Solaire de l'Oise et du Nord (JASON) à Baron (Oise) en 2023 ; j'avais moi-même réussi plusieurs essais dans l'Oise à 75 mètres d'altitude et en Aveyron à 700 mètres, publiées dans le forum Astrosurf en 2023. Imager la couronne solaire en dehors des éclipses était jusqu'ici un Graal pour beaucoup de pratiquants de l'imagerie solaire, y compris pour moi. Aujourd'hui, cela devient possible même avec du matériel accessible aux amateurs, mais pas facile, n'exagérons rien !

Dès lors, réussir à nouveau cette "manip" assez exceptionnelle lors d'une occasion telle que les ROS 2024 restait un défi certes très difficile, mais qui avait de l'allure. Manque de chance, la météo peu coopérative (trop rares et trop courtes éclaircies) a rapidement douché tout espoir de succès... je suis donc rentré un peu frustré dans l'Oise avec la ferme intention de m'y remettre à la première occasion.

Le lendemain, comme pour invalider la loi de Murphy, la météo totalement dégagée espérée à Serbannes était bien là dans l'Oise... et de plus, avec un ciel coronal ! Je m'en suis rapidement rendu compte en occultant le disque solaire avec le pouce, et en constatant qu'il n'y avait aucune diffusion de la lumière du Soleil dans l'atmosphère, même au voisinage immédiat du disque. Ce type de condition météorologique assez rare implique de très faibles concentrations, voire l'absence, de fines gouttelettes d'eau et de particules solides

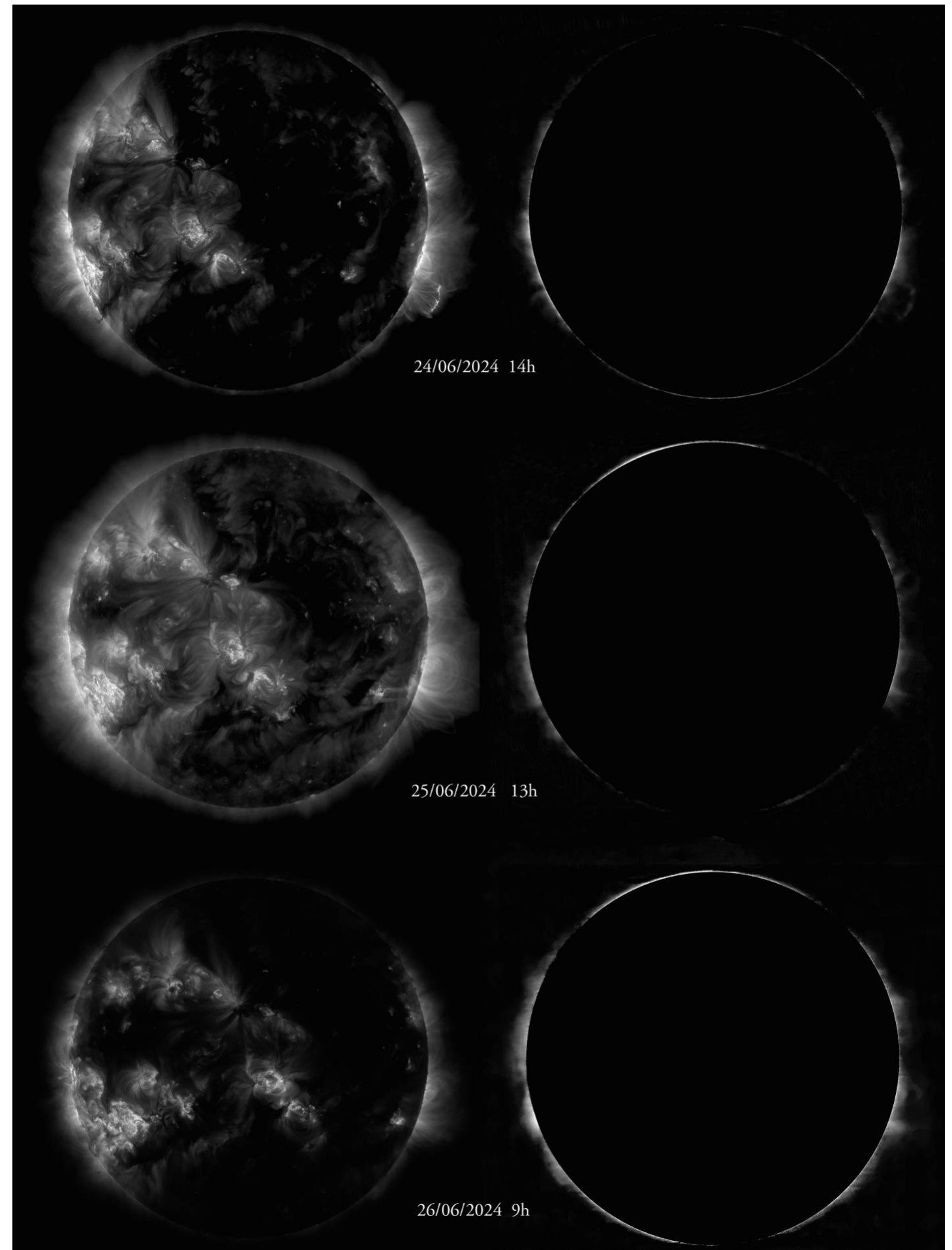
de tailles voisines des longueurs d'onde du rayonnement solaire, qui sont celles qui diffusent le plus ce rayonnement (diffusion de Mie). On peut rencontrer ces conditions dans les premiers jours de l'installation d'un anticyclone, donc d'un air plus sec, survenant juste après un train de dépressions qui a nettoyé l'atmosphère de la plupart des particules solides, qui sont en majorité des suies carbonées issues des activités humaines. Ces conditions se sont maintenues pendant 3 jours complets chez moi, ce qui m'a permis d'obtenir 3 images successives de la basse couronne solaire (voir photo 1) dont la comparaison avec les images du satellite SDO obtenues dans l'UV lointain à 211nm montre sans ambiguïté la détection effective de détails coronaux réels. Le défi est donc relevé.

Mais cette image appelle bien sûr quelques nécessaires explications sur plusieurs aspects : il convient d'abord de décrire ce qu'est la couronne solaire et quels rayonnements elle produit, puis d'explicitier le fonctionnement du Sol'Ex pour comprendre comment il peut permettre d'obtenir ce résultat, et enfin de décrire les principales étapes de l'acquisition, puis de l'indispensable traitement des images...

La couronne solaire

La couronne solaire est un milieu gazeux très dilué et très chaud s'étendant dans l'espace jusqu'à plusieurs dizaines de rayons solaires. C'est un plasma constitué d'un ensemble d'atomes très fortement ionisés du fait de la très haute température, de l'ordre du million de degrés. La compo-

1. La couronne solaire E
 imagée par SDO (à
 gauche) et par l'auteur
 avec un Sol'Ex (à droite)
 pendant 3 jours de juin
 2024.



sition chimique est identique à celle du Soleil lui-même et est donc dominée par des protons (noyaux d'hydrogène ionisé) et des électrons libres ; on y trouve également en faibles concentrations les éléments présents dans la chromosphère qui sont à l'origine de l'absorption de certaines longueurs d'onde du rayonnement continu de la photosphère.

Si on regarde plus en détail, la couronne solaire comporte 3 composantes.

La couronne d'émission (couronne E)

C'est la partie basse de la couronne, et globalement la moins intense. On y trouve en particulier des atomes métalliques très fortement ionisés qui ont pu perdre jusqu'à 15 électrons et qui présentent des raies d'émission dont certaines sont relativement intenses, en particulier celle du Fe XIV à 530,286 nm. Il s'agit donc d'atomes de fer ayant perdu 13 électrons : on conçoit donc qu'il faut une température très élevée pour obtenir ce résultat. Ce contraste de température entre la couronne et la chromosphère dont la température n'est que de 7000 K n'est d'ailleurs toujours pas élucidé : les jets de plasma éjectés par la surface à grande vitesse, sous l'influence des champs magnétiques, jouent peut-être un rôle dans ce phénomène. La température extrêmement élevée de la couronne E provoque également une émission intense dans l'ultraviolet extrême, en particulier à 211 nm, toujours produite par l'ion Fe XIV : ces rayonnements sont entièrement absorbés par l'atmosphère mais sont détectables par les sondes en orbite telles que SDO (Solar Dynamics Observatory). Le même ion Fe XIV en étant à l'origine, les images produites par SDO à 211 nm sont proches de celles qu'on peut obtenir en examinant la raie Fe XIV dans le visible, ce qui autorise la comparaison directe que nous faisons sur la photo 1. D'autres raies coronales, nettement moins intenses, sont présentes dans le domaine visible, comme Ni XII, Ni XIII et Ca XV.

L'étendue de la basse couronne est relativement faible : quelques minutes d'arc au-delà de la surface solaire, soit quelques dixièmes de rayons solaires. Elle est bien souvent parcourue par des protubérances, qui sont des jets de plasma beaucoup plus dense, plus froid (10 000 K) et plus lumineux que la basse couronne. Ils sont produits par des champs magnétiques localement très intenses.

La couronne de Fraunhofer (couronne F)

Elle est constituée de poussières chauffées par le Soleil et qui retombent sur celui-ci.

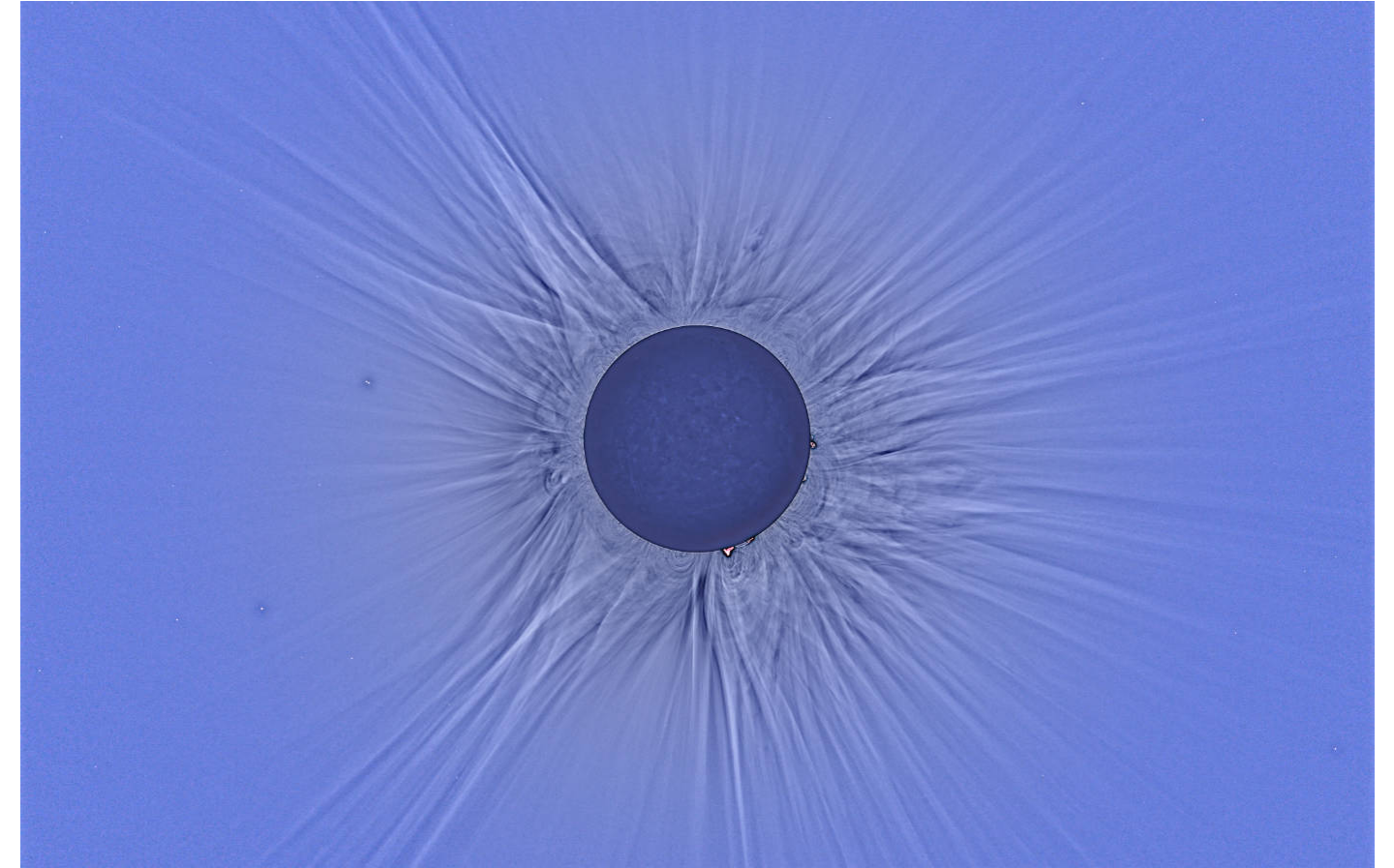
Une partie est originaire du Système solaire lui-même, l'autre du milieu interstellaire dans lequel se déplace notre étoile. Arrivées près du Soleil, ces particules diffusent la lumière photosphérique dans toutes les directions sans changement de longueur d'onde : le spectre qui en découle conserve donc les raies d'absorption (dites de Fraunhofer) de cette lumière photosphérique. Cette couronne s'étend dans l'espace assez loin du Soleil dans le plan de l'écliptique : c'est la lumière zodiacale. Sa structure n'est pas dépendante des champs magnétiques locaux : sa forme est donc globalement symétrique et ne comporte pas de morphologie remarquable : on s'efforcera donc de supprimer sa contribution dans les images. L'intensité lumineuse de la couronne F est plus faible que celle de la couronne E dans la basse couronne, mais décroît beaucoup moins vite plus loin du Soleil puisque les poussières restent présentes en concentration notable à distance du Soleil.

La couronne K (pour Kontinuum, spectre continu)

Elle est constituée du même plasma que la couronne E, mais la lumière qu'elle produit est le résultat d'un autre phénomène physique : la diffusion de la lumière photosphérique par les électrons libres du plasma (diffusion Thomson). Les électrons étant portés à des températures extrêmes, leur agitation thermique et donc leur vitesse est très grande : bien que la diffusion s'effectue sans changement de longueur d'onde, la très grande vitesse des électrons diffuseurs étale considérablement toutes les longueurs d'onde du rayonnement diffusé par effet Doppler. Le spectre d'absorption de la photosphère est ainsi "effacé" et la couronne K apparaît blanche avec un spectre continu, d'où son nom. La couronne K est globalement plus brillante que la couronne E dans la basse couronne, mais moins brillante que cette dernière à la longueur d'onde de 530,286 nm du Fe XIV.

La couronne E et la couronne K sont sculptées par les lignes du champ magnétique solaire (boucles coronales, lignes de champ ouvertes dans l'espace responsables du vent solaire). En effet, ces lignes de champ canalisent les particules chargées du plasma et les maintiennent en altitude, car les forces électromagnétiques peuvent être plus fortes que la gravité. L'aspect visuel de la couronne traduit donc directement l'activité magnétique du Soleil.

On conclut de tout ceci que nous avons 2



possibilités d'observer la couronne solaire sur Terre :

- révéler la couronne K en lumière blanche, mais avec obstruction du disque solaire pour éliminer au mieux l'aveuglante lumière photosphérique, en profitant d'une éclipse ou en utilisant un élément occulteur dans un coronographe ;
- filtrer le rayonnement reçu le plus étroitement possible autour de la raie d'émission du Fe XIV, en espérant que celle-ci ne soit pas noyée dans la diffusion atmosphérique et/ou instrumentale de la lumière photosphérique autour du Soleil. On observe alors la couronne E.

La première possibilité d'observation est bien connue, c'est celle permise par les éclipses.

Les éclipses

La couronne K est observable pendant la phase de totalité d'une éclipse totale, lorsque l'observateur se trouve dans le cône d'ombre projeté sur la Terre par la Lune. La lumière incidente photosphérique étant bloquée par la Lune, l'atmosphère ne diffuse plus de lumière autour du disque (il fait "nuit") et la couronne K devient visible. Étant donné sa très grande dynamique, il

faut la photographier en utilisant une grande plage de temps d'exposition, idéalement avec plusieurs poses acquises en mode rafale pour chaque temps d'exposition. Un traitement d'image de type HDR (High Dynamic Range), relativement complexe, permet ensuite de reconstituer une image unique avec une dynamique étendue sur 32 bits, de façon à révéler l'ensemble de la couronne K jusqu'à plusieurs rayons solaires (voir photo 2).

Le coronographe

C'est un dispositif instrumental qui permet de réaliser une éclipse artificielle au moyen d'un cône occulteur, placé au foyer de l'instrument d'observation, qui bloque la lumière directe du Soleil. Il faut cependant également bloquer la lumière diffusée par les imperfections des lentilles et celle diffractée par le bord de l'objectif. C'est le rôle du diaphragme de Lyot et d'optiques complémentaires de transfert. Un filtre H-alpha est la plupart du temps inséré dans le trajet lumineux pour réaliser de superbes observations des protubérances, bien plus spectaculaires que celles qu'on peut faire sans coronographe, avec un filtre interférentiel H-alpha très étroit.

Les coronographes professionnels tels que celui du Pic du Midi (CLIMSO) ou celui de

▲
2. Image de la couronne solaire obtenue au Mexique par Christian Viladrich lors de l'éclipse totale du 8 avril 2024 (voir Astrosurf-Magazine N°129 p. 84).

Mauna Loa à Hawaï bénéficie d'optiques très peu diffusantes et d'une faible diffusion atmosphérique du fait de leur situation en altitude. Ils sont capables de détecter la basse couronne en insérant un filtre spécifique de la raie Fe XIV dans le trajet optique. Ils peuvent également être utilisés en lumière blanche pour imager la couronne K.

Les coronographes disponibles au niveau amateur se présentent sous forme de modules à installer au foyer d'une lunette astronomique. De qualité optique moindre, ils ne permettent généralement que l'observation des protubérances, du fait d'une trop grande diffusion instrumentale qui masque la couronne E.

Un amateur américain, George Hripsack, a néanmoins réussi à imager la couronne E au moyen d'un coronographe de 50 mm de construction maison, équipé d'un filtre FeXIV à 1,2 Å de bande passante (voir photo 3). Il est même le premier amateur à avoir visualisé en novembre 2021 la couronne E au niveau de la mer. Ceci a été rendu possible par l'utilisation de lentilles avec un excellent état de surface et sans traitement anti-reflets.

On comprend cependant que l'observation et l'imagerie de la couronne E restent extrêmement délicates au niveau amateur avec un coronographe. Alors qu'elles se révèlent non pas faciles, mais au moins un peu plus accessibles avec un spectrohéliographe tel que le Sol'Ex... et les procédures adéquates d'acquisition et de traitement des images.

Mais qu'est-ce que le Sol'Ex ?

Sol'Ex est un spectrohéliographe développé par Christian Buil sur une base légère et peu onéreuse puisque, en dehors des optiques, l'amateur peut le construire lui-même en polymère PETG par impression 3D. Tous les fichiers d'impression nécessaires sont en libre accès sur le site de Christian :

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

Schématiquement, le principe du spectrohéliographe consiste à focaliser l'image du Soleil sur la fente d'entrée du spectrographe à l'aide d'une lunette astronomique (un télescope Newton à miroir primaire désaluminé peut aussi être utilisé, ou un petit Maksutov). On fait défiler cette image sur la fente soit en utilisant le déplacement naturel du Soleil en ascension droite (durée : 2 minutes), soit en utilisant le moteur d'ascension droite d'une monture équatoriale en station qui porte l'ensemble, ce qui permet d'accélérer le balayage et



▲ 3. Image de la couronne E dans la raie Fe XIV, obtenue par G. Hripsack au moyen de son coronographe maison de 50 mm. Image prise en 2023 à 400 mètres d'altitude

d'obtenir davantage de données dans le même temps. L'image du Soleil est ainsi découpée en tranches (voir figure 4). Chaque tranche est dispersée en longueurs d'onde par un réseau de diffraction holographique mobile en rotation, ce qui permet de sélectionner la fenêtre de longueurs d'onde qui va atteindre le capteur en sortie. Ce dernier reçoit, à l'instant t, l'image d'une tranche de Soleil dispersée en longueurs d'onde. La photo 5 donne l'exemple d'une telle image centrée ici dans la raie H-bêta, couvrant une largeur spectrale d'environ 140nm entre le haut et le bas de l'image. On y reconnaît une quantité de raies d'absorption correspondant à divers éléments présents dans la chromosphère ! Comme on a besoin d'une cadence d'acquisition rapide, on isole la raie d'absorption qui nous intéresse (par exemple H-alpha) par une région d'intérêt (ROI, voir photo 6 qui montre la raie Fe I et d'autres raies plus faibles). La caméra enregistre donc, pendant le balayage, un film en format SER dont chaque image est une image d'une tranche du Soleil dispersée en longueur d'onde et centrée sur une raie d'intérêt.

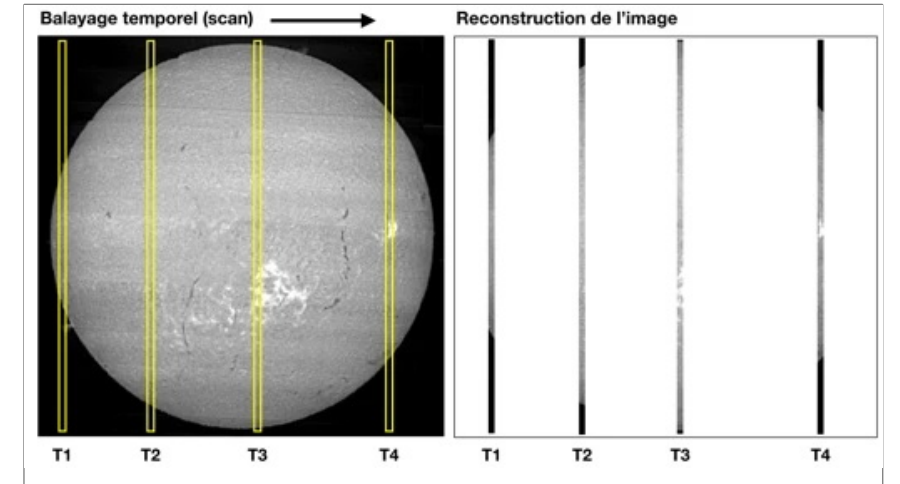
Le logiciel INTI développé par Valérie Desnoux est capable de déterminer les in-

tensités absorbées tout le long de la raie d'absorption visible dans l'image de la tranche, soit de façon automatique si la raie d'intérêt est la plus intense dans la ROI, soit en respectant un décalage, fourni par l'utilisateur, par rapport à une raie de référence (ce sera le cas lors des observations de la couronne E, voir plus loin). INTI traduit ces intensités sous la forme d'une colonne de pixels qu'il enregistre dans une image de sortie. Chaque tranche de Soleil donne ainsi lieu à une colonne de pixels dans cette image de sortie, qui est donc reconstruite séquentiellement jusqu'à donner une image du disque entier si la focale de l'optique utilisée n'est pas trop grande (voir photo 7).

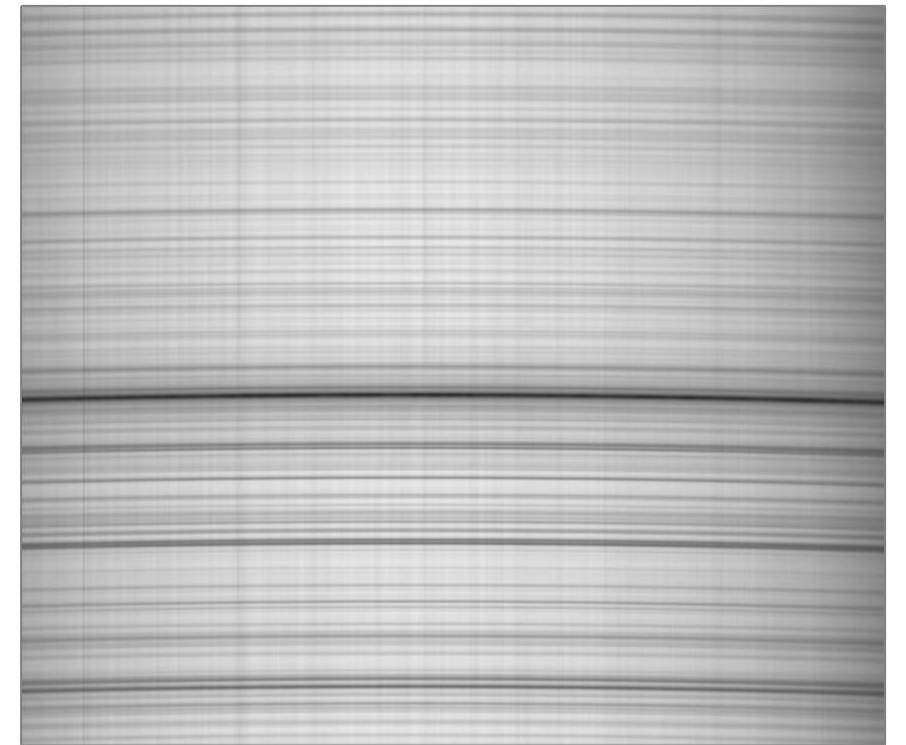
Pour les fans d'optique, la figure 8 montre le trajet optique au sein du spectrohéliographe. L'image du Soleil est formée par l'instrument optique utilisé à son foyer, où se situe la fente d'entrée. Une lentille collimatrice permet d'attaquer le réseau par un faisceau parallèle (une condition nécessaire à son bon fonctionnement). Ce dernier disperse angulairement ce faisceau incident en une multitude de faisceaux parallèles de longueurs d'onde différentes (représentés pour l'exemple en trois faisceaux rouge, vert et bleu sur la figure 8). Pour finir, une lentille objectif refocalise tous ces faisceaux dans le plan du capteur : on constate qu'ils sont bien séparés dans l'image fournie par celui-ci.

Sol'Ex, comme tous les spectrohéliographes, ne peut donc pas donner d'image en direct du Soleil, contrairement aux dispositifs de filtration plus classiques à base de filtres à bande étroite. Il va nécessiter tout d'abord 5 à 10 secondes de balayage du disque et d'acquisition vidéo simultanée, puis à nouveau quelques secondes à quelques dizaines de secondes de traitement du film SER par le logiciel INTI. On n'est donc pas en temps réel, mais l'image résultat peut néanmoins être obtenue en une minute, voire moins selon les capacités informatiques utilisées.

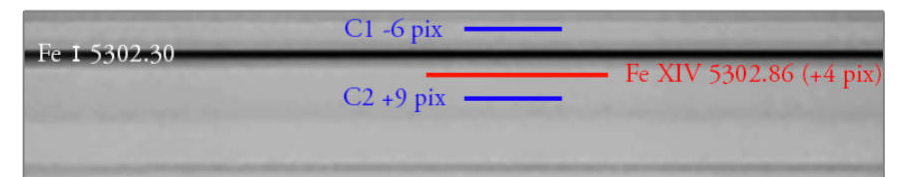
Une autre conséquence de ce mode de fonctionnement est une influence plus marquée de la turbulence, puisque la durée d'un balayage complet du Soleil est typiquement de l'ordre de la dizaine de secondes. On est donc loin ici des fractions de millisecondes exigées pour "figer" la turbulence lors des acquisitions en bande étroite classique. On va donc être sensible aux rafales de vent et aux accès de turbulence, et aussi aux imperfections de déplacement de la monture, qui toutes



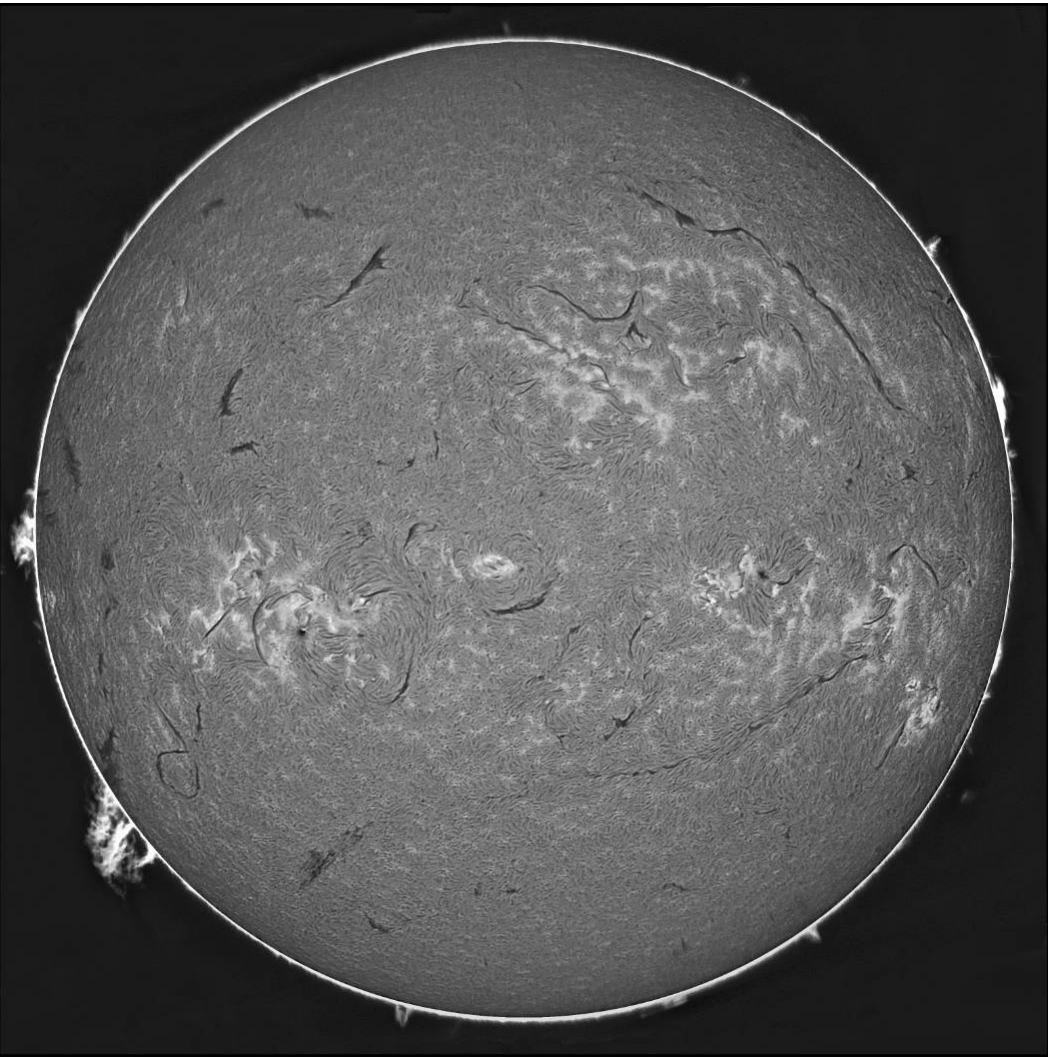
▲ 4. Principe d'acquisition séquentielle d'un spectrohéliographe. Source Christian Buil.



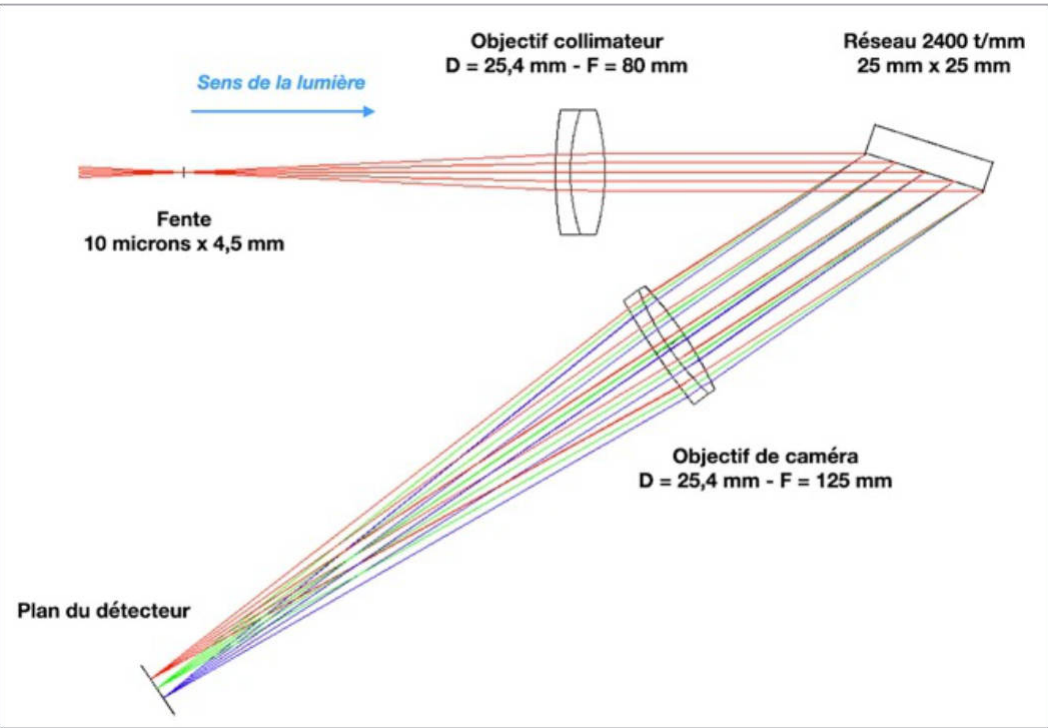
▲ 5. Image d'une tranche de Soleil dispersée en longueur d'onde telle que reçue par le capteur en sortie de Sol'Ex, ici centrée autour de la raie H-bêta (la plus intense au centre). Photo de l'auteur.



▲ 6. ROI d'acquisition centrée autour de la raie Fe XIV dont la position est matérialisée par le trait rouge. La raie Fe I sert de référence. Les traits bleus matérialisent les positions du continuum local utilisées dans l'extraction du signal Fe XIV. Photo de l'auteur.



7. Image obtenue par Sol'Ex dans la raie H-alpha, 20 mai 2024. Photo de l'auteur.



8. Trajets optiques dans Sol'Ex. Source C. Buil.

peuvent engendrer des perturbations sur l'image : hachures de petite ou grande amplitude et déformations locales ou d'ensemble du disque. Une monture correctement réglée (jeux, graissage...), utilisée dans son sens de défilement préférentiel est ou ouest, et le compositage de plusieurs balayages successifs permettent néanmoins de s'affranchir de tout ou partie de ces problèmes. En effet, les focales utilisées sont relativement faibles (inférieures à 500 mm) ; par conséquent, les détails du Soleil visibles à cette focale changent peu sur quelques minutes, hors phénomènes éruptifs. On peut donc composer plusieurs dizaines de balayages consécutifs.

Sol'Ex a par contre l'immense avantage de pouvoir imager le disque solaire dans de multiples longueurs d'onde, telles que H-alpha, H-bêta, Ca II H, Hélium D3, Fe I, Fe XIV pour ne donner que quelques exemples les plus usités. Ceci donne accès à des phénomènes physiques tout à fait particuliers tels que l'imagerie Doppler qui montre la rotation du Soleil sur lui-même et les vitesses radiales locales autour des filaments et taches, l'effet Zeeman qui permet d'imager le champ magnétique du Soleil, ou la détection de la couronne solaire qui nous occupe ici. La bande passante de Sol'Ex est de l'ordre de 0,2 Å, ce qui est très étroit, et fournit donc des images à très haut contraste. Le lecteur intéressé par davantage de précisions quant aux différentes observations possibles avec Sol'Ex pourra se reporter à la page du site Internet de Christian Buil déjà indiquée plus haut.

La photo 9 montre Sol'Ex fixé au foyer d'une lunette astronomique de diamètre 80 mm et de focale 480 mm, le tout monté sur une monture équatoriale motorisée : l'objectif de légèreté et de compacité est parfaitement respecté !

L'imagerie de la couronne solaire avec Sol'Ex : l'acquisition des images

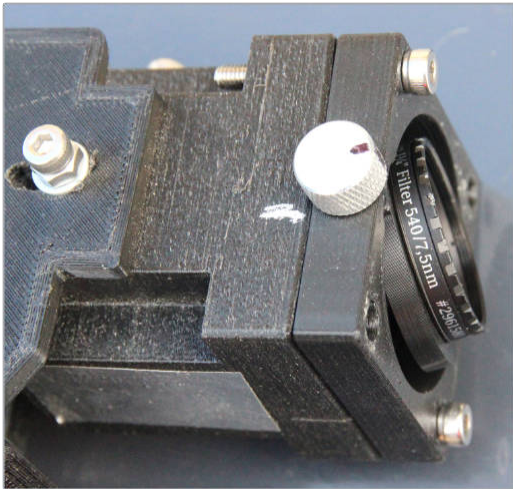
Nous avons vu lors de la description de la couronne solaire que choisir la raie Fe XIV à 530,286 nm constitue la meilleure chance de détecter la couronne E. Autant que possible, on tentera cette imagerie en altitude ou, tout au moins, en conditions coronales ou quasi coronales (quand le ciel reste d'un bleu soutenu même au voisinage immédiat du Soleil occulté par le pouce). Afin de réduire au maximum l'influence de la diffusion instrumentale, on introduit devant la fente un filtre à bande relative-



9. Sol'Ex au foyer d'une lunette astronomique, le tout sur monture équatoriale, prêt pour l'acquisition. La flèche rouge pointe le filtre vert à bande étroite utilisé en imagerie de la couronne E. Photo de l'auteur.

ment étroite (filtre Continuum centré sur 540 nm et de largeur 75 Å) qu'on va incliner de 25° environ pour décaler sa bande passante vers 530 nm pour cibler la raie Fe XIV (voir photo 10). La flèche rouge sur la photo 9 montre la position de ce filtre dans l'équipement complet.

Revenons en détail sur la photo 6 qui montre une ROI étroite (quelques Å) au voisinage de la raie Fe I relativement intense à 530,230 nm. La position de la raie Fe XIV y est matérialisée par le trait rouge.



10. Filtre vert continuum monté devant la fente de Sol'Ex, incliné à 25°. La lumière solaire vient de la droite. Photo de l'auteur.

Elle est invisible à l’œil dans cette portion de spectre, ce qui signifie qu’on s’intéresse à un signal très faible et que des stratégies visant à optimiser le rapport signal sur bruit (RSB) sont nécessaires. On va donc travailler en bin2 lors de l’acquisition. Ceci va bien sûr dégrader la résolution spectrale d’un facteur 2, ce qui n’est pas dramatique dans ce cas de figure étant donné l’élargissement naturel de la raie Fe XIV par effet Doppler dans la basse couronne. On gagne par contre beaucoup en RSB, non seulement par effet de moyennage de pixels à la reconstruction de l’image, mais aussi parce que travailler en bin2 implique mathématiquement de multiplier le temps d’exposition des images unitaires d’un facteur 2, pour garder un Soleil rond après reconstruction de l’image finale. Les mises au point étant faites (d’abord celle des raies du spectre côté caméra, puis celle des bords du disque solaire côté lunette), on va créer une ROI étroite (40 pixels avec une caméra IMX178 utilisée en bin2, photo 5). Ceci permettra à INTI, dans la phase du traitement, de reconnaître automatiquement la position de la raie intense Fe I qui va nous servir de référence, sans risquer d’être perturbé par la présence d’une autre raie intense dans la fenêtre d’acquisition. L’autre gros avantage de cette détection automatique est de pouvoir compenser la lente dérive du spectre sur le capteur, vers le haut ou le bas, liée à l’échauffement de Sol’Ex pendant les nombreux balayages du Soleil que nous allons devoir effectuer : INTI se recalera toujours sur cette raie Fe I de référence pour aller chercher la raie Fe XIV "invisible". A ce stade, la logique voudrait qu’on monte le gain de la caméra pour amplifier le faible signal Fe XIV en bord de disque, quitte à saturer complètement ce dernier qui ne nous intéresse pas ici. Il faut au contraire veiller à ce que le fond de la raie Fe I reste parfaitement visible dans la ROI, y compris au centre du disque, de telle sorte qu’INTI puisse toujours déterminer l’équation du polynôme de degré 2 qui modélise cette raie de référence. Nous avons vu qu’on cherche à imager un signal très faible. On conçoit donc facilement qu’empiler un grand nombre de balayages acquis le plus rapidement possible est nécessaire. De nombreux essais m’ont conduit à empiler 100 balayages pour optimiser le résultat ! Ceci est rendu possible parce qu’à l’échan-

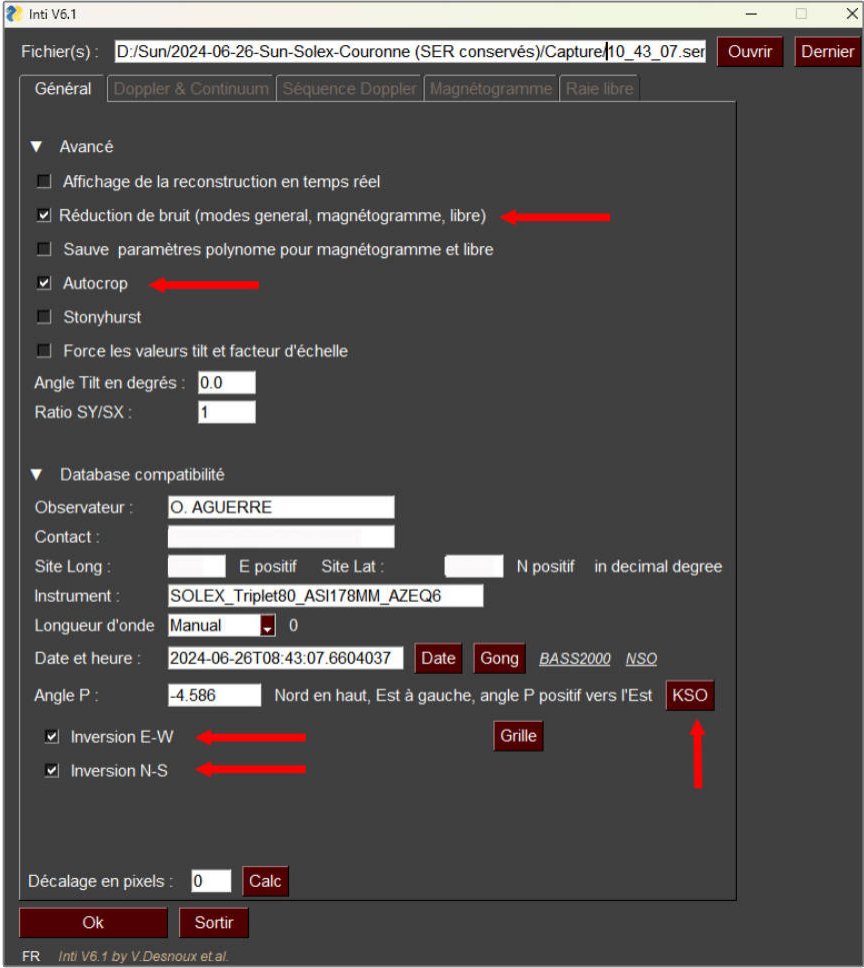
tillonnage utilisé (environ 1,3 seconde d’arc par pixel), les détails de la couronne E évoluent peu pendant les 40 minutes d’acquisition nécessaires. Il est ici fondamental de piloter l’acquisition avec un script Python (par exemple dans le logiciel Sharpcap), qui synchronise le lancement du balayage avec le déclenchement de l’enregistrement du film, et qui, le balayage terminé, stoppe l’enregistrement et retourne la monture à grande vitesse à son point de départ avant d’enchaîner automatiquement le balayage et l’enregistrement suivants. On peut s’inspirer pour ce script des réalisations existantes d’amateurs, trouvables sur Internet dans les groupes d’utilisateurs Sol’Ex.

Le traitement des images

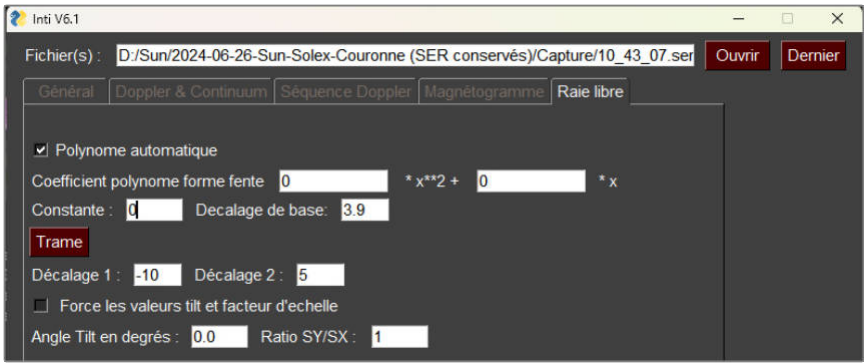
Le signal très faible de la raie Fe XIV est obtenu en soustrayant, à l’intensité relevée à la position de cette raie (trait rouge sur la photo 6), la contribution du continuum voisin. On espère ainsi "extraire" le signal Fe XIV initialement noyé dans ce continuum. On rappelle ici que ce continuum, dans la basse couronne, est produit par les couronnes K et F et par la diffusion instrumentale et atmosphérique de la lumière photosphérique. Pour retirer cette contribution, on utilise 2 positions précises dans le continuum (traits bleus sur la photo 6), dont on va faire la moyenne des intensités avant de la soustraire à celle relevée à la position de la raie Fe XIV. INTI effectue automatiquement ces opérations si on le paramètre comme suit dans ses onglets Général et Raie Libre.

L’onglet Général est paramétré comme indiqué par la figure 11. Le mode "Réduction de bruit" est coché. Il permet d’améliorer un peu le RSB en effectuant une moyenne pondérée entre le fond de la raie Fe XIV et ses ailes bleue et rouge décalées d’un pixel, profitant de l’élargissement de cette raie par effet Doppler. Le mode "autocrop" assure un même centrage et positionnement du disque solaire pour toutes les images individuelles obtenues, ce qui facilitera leur empilement ultérieur. Le bouton KSO fournit l’angle P (inclinaison de l’axe polaire du Soleil par rapport à celui de la Terre : ceci permettra d’obtenir des images solaires bien orientées avec le nord en haut. Les cases "inversion E-W et N-S" permettent d’éviter les effets miroir dans les images finales, selon le sens de balayage de la monture ou sa position par

rapport au méridien pendant l’acquisition. Ce n’est pas tout. Il faut maintenant indiquer à INTI où se trouve la raie Fe XIV, et les positions de continuum qu’on va lui soustraire, par rapport à la raie Fe I de référence. Pour ce faire, l’onglet "raie libre" d’INTI est paramétré comme indiqué par la figure 12. On y coche l’option "polynôme automatique" et on laisse les deux coefficients du polynôme, ainsi que la constante, à 0 car on va laisser INTI déterminer automatiquement l’équation du polynôme de la raie Fe I, la plus intense dans la ROI (d’où l’intérêt d’une ROI étroite...). Avec une caméra IMX178 utilisée en bin2, la dispersion angulaire du spectre produite par le réseau est de 0,145 Å par pixel. Pour aller chercher la raie Fe XIV à 530,286nm à partir de la raie Fe I à 530,230nm, il faut donc se décaler de 3,9 pixels vers le rouge : valeur à mettre dans "décalage de base". On indique ensuite les 2 positions de continuum choisies dans "Décalage 1" et "Décalage 2" : ici, -10 pixels et +5 pixels par rapport à la raie Fe XIV. Une fois paramétré ainsi, INTI va traiter en lots les 100 SER que nous avons acquis, et produire 100 images individuelles. La photo 13 présente l’une de ces images unitaires, dans laquelle j’ai ajouté un faux disque occulteur (ces images ne présentant aucun intérêt sur le disque) et tiré sur les niveaux pour commencer à révéler un signal coronal faible et bruité, mais bien présent. Ces 100 images unitaires produites par INTI peuvent comporter des valeurs négatives (puisque produites par des opérations de soustraction) : on utilise le logiciel SIRIL via une macro pour additionner une constante à ces images, car beaucoup de logiciels classiques de traitement d’image apprécient peu les valeurs négatives. Dans AutoStakkert!, on va ensuite tracer manuellement des points d’alignement (AP) de grande taille (200 pixels) uniquement autour du limbe, et on empile la totalité des images sans alignement global préalable, puisque INTI produit déjà des images globalement alignées entre elles. Cela donne le résultat visible sur la photo 14. Cette image subit ensuite des opérations de retrait de la striation horizontale inhérente à la spectrohéliographie (via les plugins Astronomy Tools pour

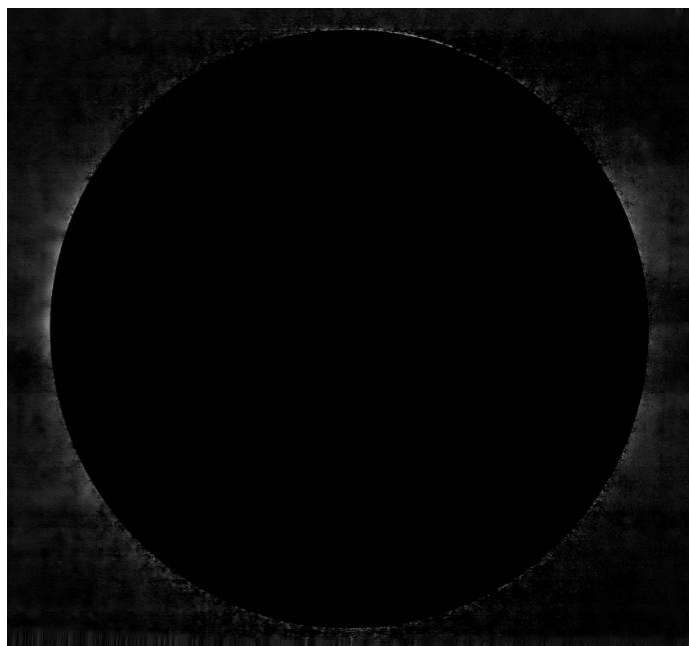


▲ 11. Paramétrage de l’onglet « général » d’INTI. Les flèches rouges pointent les paramètres importants.

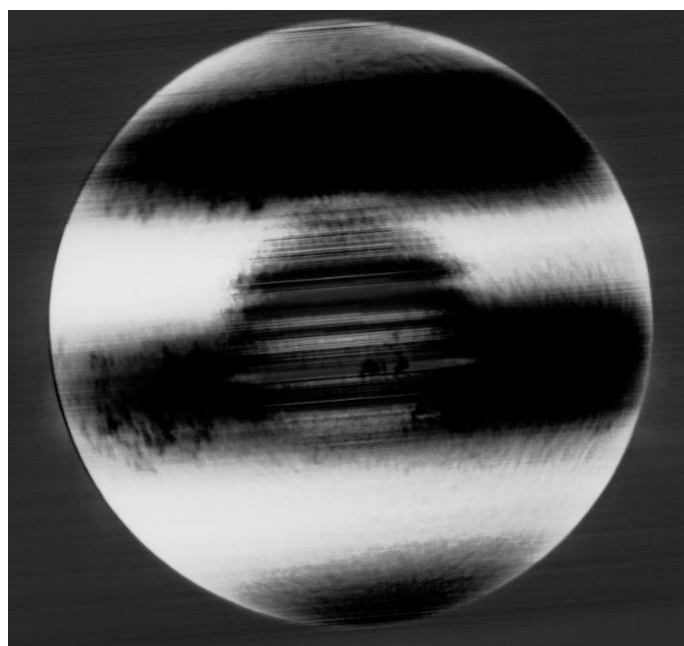


▲ 12. Paramétrage de l’onglet « Raie libre » d’INTI.

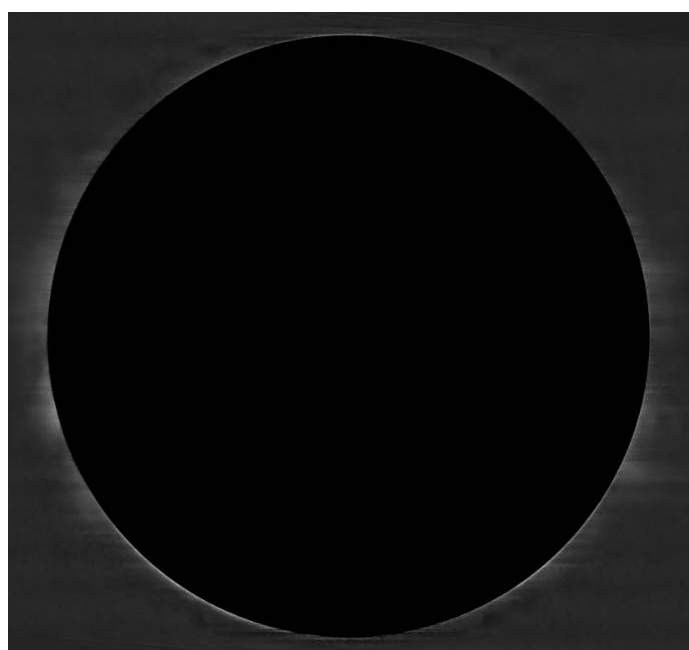
Photoshop, ou le logiciel Untransversaliumisator de Philippe Rousselle), puis de retrait de gradient. Cela donne la photo 15 dans laquelle un faux disque occulteur a été ajouté. Pour finir, on réalise des opérations complémentaires de montée d’histogramme, de réduction de bruit et d’ajustement de la dynamique, pour produire l’image finale (voir photo 16) qu’on va comparer avec les images SDO à 211nm pour évaluer la pertinence des détails visibles



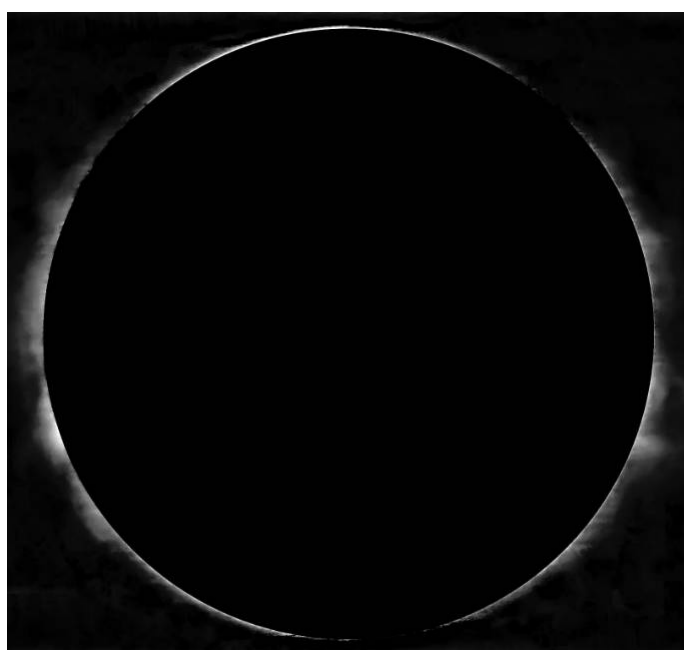
▲ 13. Image unitaire issue d'un seul balayage, dans la raie Fe XIV. Photo de l'auteur.



▲ 14. Image issue de l'empilement par AutoStakkert! de 100 images unitaires dans la raie Fe XIV. Photo de l'auteur.



▲ 15. L'image Fe XIV après plusieurs opérations de retrait de striations et de gradient. Photo de l'auteur.



16. Résultat final, après plusieurs opérations de montées d'histogramme et de réduction de bruit. Photo de l'auteur.

(voir photo 1, la boucle est bouclée !). On n'y voit pas de protubérances : c'est normal, puisque nous sommes ici dans la raie Fe XIV alors que les protubérances émettent principalement dans la raie H-alpha.

L'ensemble de ces phases de traitement n'est pas très lourd : c'est l'affaire d'environ trente minutes seulement après qu'INTI a produit les 100 images unitaires.

Au premier abord, cette image n'est bien entendu pas très spectaculaire par rapport à ce qu'on peut voir pendant une éclipse, mais il faut bien avoir présent à l'esprit que réaliser ce type d'images hors éclipse, surtout au niveau de la mer, reste pour l'instant tout à fait exceptionnel... avant bien entendu que de nombreux lecteurs équipés de Sol'Ex ne tentent eux aussi l'aventure !