

# Observation solaire - Qualité de protection oculaire

Michel Willemin et Raoul Behrend

## 1. Historique de l'observation solaire

Dès les débuts de l'astronomie, soit bien avant l'apparition du télescope, le Soleil a toujours été un astre extrêmement fascinant. Jusqu'au 17<sup>ème</sup> siècle, l'homme se contentait essentiellement d'étudier l'évolution de sa position dans le ciel au fil du temps. D'innombrables constructions, alignements ou édifices ont révélé aux archéoastronomes que les anciens avaient déjà de très bonnes connaissances de mécanique céleste. En particulier, des sites très célèbres comme Stonehenge, certaines pyramides égyptiennes ou encore d'autres constructions Mayas étaient conçus de manière à mettre en évidence une intéressante configuration géométrique en relation entre l'astre du jour et d'autres corps célestes [1].

L'observation relativement systématique du disque solaire et en particulier des taches solaires, reflet de l'activité du Soleil, ne débuta véritablement qu'après la construction de lunettes astronomiques par Galilée, soit dès l'automne 1610. Des écrits antérieurs à cette époque relataient déjà l'existence de telles taches. Cependant, l'observation à l'œil nu des plus grandes n'est possible que lors des levers et couchers de Soleil en présence d'une absorption atmosphérique optimale. Une telle méthode ne permet pas une étude systématique de leur évolution au cours du temps ; un instrument d'optique, même primitif est indispensable. Lors de ses premières démonstrations, Galilée était loin de faire l'unanimité. Ses détracteurs affirmaient que ces taches n'avaient aucun lien avec le Soleil, mais provenaient de ses optiques... Galilée réalisait déjà de superbes dessins de la structure du Soleil, permettant un archivage et un suivi de son activité. La photographie solaire, permettant une documentation encore plus précise, a fait son apparition le 2 avril 1845, lorsque Fizeau et Foucault ont mis au point et appliqué avec succès un nouveau développement photographique. La qualité de leur premier cliché permettait de mettre en évidence la présence de taches, ainsi que l'assombrissement du disque solaire vers le bord [2].

Jusqu'à nos jours, la surveillance de l'activité solaire n'a cessé de s'intensifier. L'instrumentation optique s'est continuellement perfectionnée. Le Soleil n'est plus seulement observé en lumière polychromatique (lumière « blanche ») comme autrefois, mais également en lumière quasi-monochromatique, c'est-à-dire où une longueur d'onde est sélectionnée. En isolant par exemple la raie H $\alpha$  de l'hydrogène ( $\lambda = 656.29$  nm), les protubérances apparaissent de manière spectaculaire. Les longueurs d'ondes hors du spectre visible, comme les ultraviolets ou les rayons X sont quotidiennement utilisées par des satellites placés en orbite et permettent d'étudier le Soleil sous un autre aspect. Toutes ces nouvelles techniques ont contribué de manière fulgurante

à la progression des connaissances sur le fonctionnement de la « machine » Soleil [3,4].

## 2. Le rôle des amateurs

Mais quel rôle peut encore jouer l'astronome amateur après une telle percée technologique ? Il faut admettre que la contribution scientifique de la plupart des astronomes amateurs concernant l'astronomie solaire n'est plus franchement significative. Un astronome qualifié de pantoufflard sera facilement tenté de consulter les sites Internet spécialisés comme, par exemple, <https://sohowww.nascom.nasa.gov/> ou encore <https://www.spaceweather.com/> pour connaître l'activité solaire du jour plutôt que de sortir une instrumentation sur son balcon. Fort heureusement, il existe encore des exceptions où les travaux des amateurs restent importants et nécessaires, comme pour les éclipses solaires. Il faut relever que certains amateurs, disposant de matériel relativement perfectionné, obtiennent des photographies solaires à haute résolution rivalisant avec les résultats de professionnels.

Hormis le côté scientifique pur, les amateurs jouent un rôle d'information du public au sens large, que ce soit à titre privé ou au sein des sociétés d'amateurs. Ce travail de vulgarisation relatif aux phénomènes solaires n'est, en aucun cas, à négliger. D'autre part, l'observation directe de l'astre du jour au moyen de télescopes ou lunettes procure toujours un énorme plaisir à l'amateur mordu par l'astronomie solaire. En aucun cas il ne se satisfera d'observations indirectes comme par Internet. La pratique de la photographie de la surface solaire peut livrer d'intéressants résultats et est également très prisée des amateurs. Cependant, la sécurité lors de l'observation et de la photographie solaire est, aujourd'hui encore, trop souvent négligée ou simplement méconnue. La curiosité de l'observateur solaire n'est, fort heureusement, pas incompatible avec la qualité de protection oculaire. Une observation en toute sécurité requiert deux critères essentiels : la discipline de l'observateur et le niveau de qualité des filtres utilisés.

## 3. La protection de la vue et les dangers

Mais quelle technique faut-il adopter pour observer ou photographier le Soleil avec un bon degré de sécurité ? En cas de protection insuffisante lors de l'observation solaire, la vue risque de subir des dommages qui pourront être même irréversibles. Les dégâts pourront se manifester soit à court ou soit à long terme, dépendant du degré de défaillance de la protection. En cas d'oubli de placement du filtre solaire sur le télescope ou la lunette, la puissance lumineuse pénétrant l'œil conduira à une cécité immédiate et très souvent définitive, même avec de petits instruments. Ce genre d'accidents graves est, fort heureusement, extrêmement rare. Des conséquences similaires peuvent intervenir lorsque le Soleil est observé au moyen de filtres placés

juste devant l'oculaire, qui devraient d'ailleurs être proscrits. Ces filtres peuvent littéralement exploser suite à un échauffement excessif, car ils sont situés à proximité du plan focal. La vieille méthode de la projection du disque solaire sur un écran, sans danger pour la vue, est la meilleure si l'observateur ne dispose pas de matériel sûr et adapté. Cependant, la résolution obtenue par ce moyen d'observation est limitée et le contraste est médiocre pour des forts grossissements. Le matériel, en particulier l'oculaire, peut subir des dommages en cas d'utilisation d'un instrument à grand diamètre. En effet, la puissance optique ou radiance pénétrant l'oculaire est concentrée sur une petite surface, conduisant à un échauffement excessif et provoquant brûlure de graisses et poussières à la surface des lentilles. Les interfaces de lentilles collées pourront être également endommagées. L'observation directe à travers l'instrument muni d'un filtre principal placé devant l'objectif est très souvent décrite comme étant la solution idéale et elle sera souvent préférée à la méthode de projection. Cependant, la qualité de ce filtre principal est primordiale à deux titres. Il est évident que sa qualité optique doit être compatible avec celle de l'instrument utilisé. Ce critère est quasi toujours satisfait pour les filtres du commerce. Le second point, relatif à ses propriétés de transmission, est crucial. En effet, un filtre inadéquat, c'est-à-dire n'atténuant pas suffisamment le flux de photons pénétrant l'instrument, pourra provoquer une dégradation lente, mais progressive, de l'acuité visuelle. Cela peut intervenir lors d'expositions répétées à des radiances plus élevées que les limites acceptables pour l'œil humain. Un tel filtre donnera néanmoins une sensation d'accommodation relative. Ce genre de problèmes peut se rencontrer lors d'utilisations de filtres de densité pas trop élevée visant à figer la turbulence atmosphérique en utilisant des temps d'exposition extrêmement courts (1/1000 s ou moins) lors de la photographie solaire. Les filtres de densité 3 (atténuation d'un facteur  $10^3$ ) sont relativement répandus, mais doivent impérativement être évités pour l'utilisation visuelle. Un autre problème, nettement plus sournois, peut provoquer également des lésions oculaires à long terme : il s'agit des rayonnements invisibles ultraviolets (UV) et infrarouges (IR). Les récepteurs de lumière de l'œil humain regroupant les bâtonnets et les cônes ne parviennent pas à détecter cette lumière hors du spectre dit visible (longueurs d'ondes de 400 à 700 nm). Pour une observation agréable du Soleil, la densité du filtre recommandé sera voisine de 5, donc correspondant à une atténuation d'un facteur  $10^5$ . Cependant, la densité des filtres se rapporte au spectre visible et une atténuation moindre pour des longueurs d'ondes inférieures à 400 nm (UV) ou supérieures à 700 nm (IR) pourra dans certains cas entraîner des lésions oculaires lentes [5]. Des études scientifiques indiquent que le rayonnement UV prolongé peut générer des lésions au niveau de la cornée, du cristallin (cataracte) et/ou de la rétine suivant la radiance et la longueur d'onde [5,6]. Le rayonnement IR peut, lui aussi, s'avérer dangereux. De trop fortes radiances dans l'IR proche (700 – 1400 nm), dénommées IRA, peuvent provoquer des lésions à divers

niveaux de l'œil. Le rayonnement IR est fortement absorbé par la cornée, le cristallin et l'humeur aqueuse avant d'atteindre la rétine [5]. Des expositions répétées à un niveau trop élevé d'IR peuvent induire une cataracte [5,6,7]. Dans les cas extrêmes, une « cuisson » lente de la rétine peut survenir [7]. Il faut noter que le rayonnement IR, contrairement à la lumière visible et UV est potentiellement moins nocif pour l'œil humain. En effet, la lumière IR génère essentiellement des effets thermiques qui sont non cumulatifs. Pour les longueurs d'ondes plus courtes (visible et UV), un processus photo-chimique cumulatif entre en jeu. Cela explique que les seuils tolérés pour les IR sont plus élevés que pour les rayonnements de faible longueur d'onde.

Concrètement, le point intéressant pour l'observateur solaire est de savoir si la radiance parvenant à son œil, placé derrière son télescope équipé d'un filtre solaire, est inférieure au seuil de radiance maximal recommandé pour l'œil humain. Une telle vérification nécessite la connaissance des seuils de radiance spectrale admis, la mesure des propriétés de transmission du ou des filtres utilisés et, finalement, de la géométrie de l'optique de l'instrument. Les deux points d'ordre technique seront traités dans les paragraphes suivants. Concernant les seuils de radiance, plusieurs paramètres entrent en considération, notamment la longueur d'onde, la dimension apparente de la source, le temps d'exposition, la fréquence des expositions, etc... Il serait exhaustif de dresser dans cet article toutes les configurations citées dans les normes de sécurité. Etant les plus difficiles à contrôler par l'amateur, l'étude se focalisera sur les rayonnements invisibles et en particulier les IR. Les rayons UV de courte longueur d'onde (< 330 nm pour le verre BK7) qui seraient éventuellement insuffisamment atténués par le filtre solaire pourront être réduits ensuite par les éléments d'optique non réfléchissants de l'instrument comme la lame correctrice, les lentilles ou encore l'oculaire. Dans la plupart des cas, la radiance UV parvenant à l'œil est parfaitement tolérable. Contrairement au cas du rayonnement UV, les éléments d'optique précités seront transparents aux IR proches. Par conséquent, la transmission du filtre solaire dans l'IR proche devra faire l'objet d'une attention particulière. Les normes de sécurité relative aux IR proches sont relativement claires. Le seuil de dommages relatif à la rétine est estimé à  $40\ 000\ \text{W/m}^2$  [5,8]. Par contre le seuil tolérable pour une exposition prolongée et répétée est inférieur de plus de 2 ordres de grandeur à cette valeur de dommages rétinien. La radiance maximale recommandée est de  $100\ \text{W/m}^2$  au niveau de la cornée, prévenant ainsi tout risque de cataracte ou autre affection de l'œil [5,8].

Le but de cet article n'est nullement d'induire une psychose chez les observateurs, mais plutôt de les rendre attentifs aux risques découlant de leur activité. C'est pourquoi, une étude concrète relative à deux filtres couramment utilisés est présentée dans les chapitres suivants et des mesures efficaces et simples sont proposées en cas de doute de l'observateur.

Les filtres très bon marchés comme les amorces de films photographiques, les supports magnétiques tels que disquettes d'ordinateur, les verres fumés à la bougie ou les disques compacts ne seront pas étudiés explicitement dans cet article. Ils sont souvent de qualité optique médiocre et n'atténuent, en règle générale, pas suffisamment la lumière invisible [7]. Leur utilisation est donc vivement déconseillée.

#### 4. Le spectre solaire

La radiance spectrale solaire pénétrant l'instrument d'observation sera influencée par l'atmosphère terrestre. En haute altitude, les UV et les IR seront moins atténués qu'à basse altitude. La vapeur d'eau dans l'atmosphère provoque des pics d'absorption dans la partie IR du spectre. Cependant, même au niveau de la mer, les UV et les IR ne sont en aucun cas à négliger, comme le montre la Fig.1. Comme indiqué précédemment, l'optique instrumentale atténuera très fortement les UV de longueurs d'ondes inférieures à 330 nm environ, en ne filtrant, par contre, quasi nullement tout le rayonnement IR jusqu'à 2000 nm pour les verres standards. Le filtre solaire devra donc filtrer efficacement l'énergie contenue dans la partie IR du spectre.

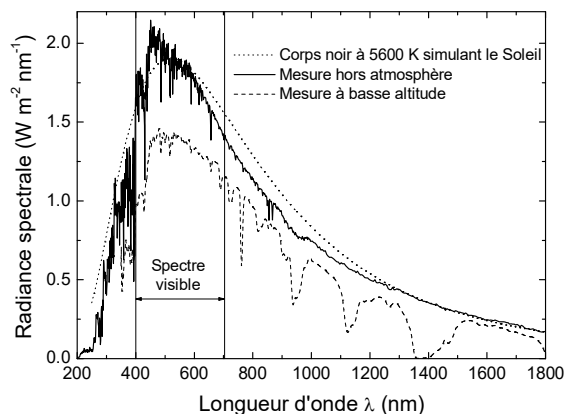


Figure 1 : Radiance spectrale solaire au niveau de la Terre. Les rayonnements UV et IR ne sont manifestement pas négligeables, même pour des observateurs situés à basse altitude. La mesure tenant compte de l'absorption atmosphérique présentée sur cette figure a été effectuée à une altitude de 300 m [9]. Les valeurs spectrales hors atmosphère sont tirées de la référence [10]. La courbe de simulation du Soleil par un corps noir à  $T = 5600\text{ K}$ , qui n'est autre qu'une distribution de Planck, donne déjà une excellente approximation du spectre.

#### 5. Evaluation des propriétés des filtres

Les fabricants de filtres solaires sont malheureusement trop avarés en informations relatives aux propriétés de transmission hors du spectre visible. La mesure précise de la transmission d'un filtre solaire sur un large spectre requiert une instrumentation onéreuse. Le système utilisé pour caractériser les filtres présentés ci-après est un instrument produit par la firme Optronic Laboratories, Inc. Une lampe halogène en quartz alimentée par une source

stabilisée génère une lumière blanche à flux constant. Cette lumière est décomposée par un monochromateur à réseau. Le spectre obtenu s'étale de 250 à 1800 nm. La résolution spectrale est déterminée par des fentes placées à l'entrée et à la sortie du monochromateur. Une résolution de 10 nm est choisie habituellement. La puissance spectrale est mesurée par des photodiodes calibrées. Pour les longueurs d'onde de 250 à 1100 nm, un senseur silicium étalonné par l'Office Fédéral de Métrologie à Wabern est utilisé. Un senseur au germanium refroidi par thermo-élément, étalonné par le NIST à Boulder (USA), permet des mesures précises de 800 à 1800 nm.

Deux filtres solaires, le film Baader Astrosolar™ de densité 5 et le traditionnel filtre au chrome, tous deux très répandus chez les amateurs, ont été caractérisés par ce dispositif. Le second filtre, utilisé depuis belle lurette chez les amateurs, est constitué d'un verre de qualité optique, comme un filtre photographique de type Skylight ou UV, recouvert d'une très fine couche de chrome. Ces filtres sont fabriqués par plusieurs entreprises spécialisées dans la métallisation sous vide. Les mesures de transmission relatives à ces deux filtres sont résumées par la Fig.2. Pour les deux filtres testés, l'absorption des rayonnements IR n'est pas aussi efficace que pour la lumière visible. Contrairement aux rayonnements UV éventuellement excédentaires, les IR ne seront pas atténués par des éléments d'optique instrumentale. Il est clair qu'un tel graphique peut paraître extrêmement alarmant au premier abord. Avant de se livrer à des conclusions hâtives, il convient néanmoins d'évaluer la puissance optique pénétrant réellement l'œil de l'observateur et de comparer avec les valeurs tolérées ou recommandées.

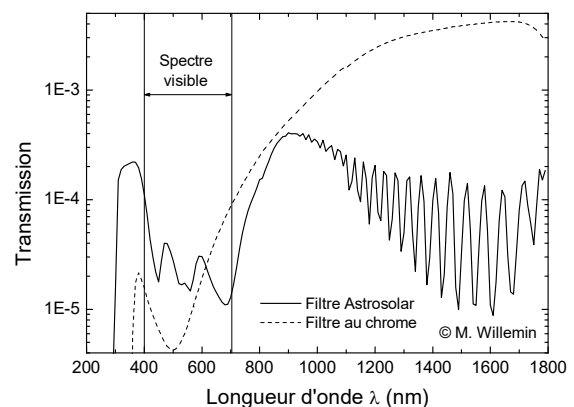


Figure 2 : Transmission spectrale du film Astrosolar™ de densité 5 et du traditionnel filtre au chrome. Noter l'échelle logarithmique en ordonnée. La transmission dans le domaine visible du spectre est bien d'environ  $10^{-5}$  pour les deux filtres. Par contre, elle est supérieure pour la lumière invisible. Les oscillations aux longueurs d'onde élevées proviennent d'interférences entre les deux faces du film Astrosolar™ relativement fin. En considérant uniquement le spectre visible, on remarque que le filtre

Astrosolar™ a une légère dominante bleue et, au contraire, le filtre au chrome présente une teinte rouge.

## 6. Le rayonnement infrarouge

Afin d'obtenir un ordre d'idée de la radiance transmise par un filtre solaire dans la région IR du spectre, il est possible de combiner les graphes des Figs.1 et 2. Comme indiqué précédemment, le rayonnement spectral dépendra de l'altitude du lieu d'observation. Cependant, la différence entre les spectres hors atmosphère et à basse altitude n'est pas énorme (Fig.1). En considérant, à titre d'exemple, le spectre en basse altitude par temps clair [9], les radiances solaires spectrales après le film Astrosolar™ de densité 5 et après le filtre au chrome sont représentées dans les Figs.3a et 3b respectivement. Ces radiances après filtre s'obtiennent par simple multiplication du spectre solaire avec la transmission du filtre considéré. La puissance par unité de surface dans le spectre IR proche, à savoir de 700 à 1400 nm, est de 76 mW/m<sup>2</sup> pour le film Astrosolar™ (Fig.3a) et de 352 mW/m<sup>2</sup> pour le filtre au chrome (Fig.3b). Les valeurs relatives à une observation hors atmosphère ou en haute altitude sont, respectivement, de 100 mW/m<sup>2</sup> et de 566 mW/m<sup>2</sup> pour ces deux filtres. Sans l'adjonction d'un instrument d'optique entre le filtre et l'œil, l'observation est parfaitement sûre dans les deux cas. Cela explique le fait que les lunettes munies de film Astrosolar™, très largement distribuées à l'occasion des éclipses, portent le label de certification européen CE.

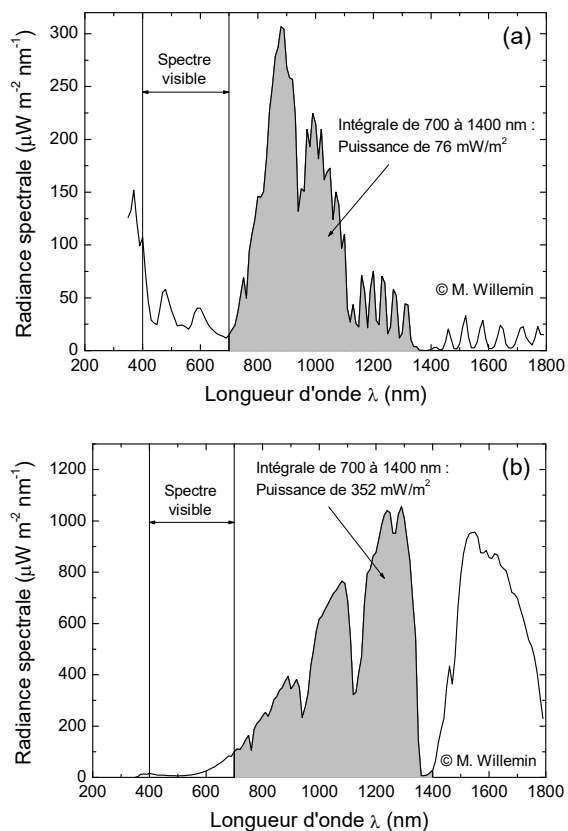


Figure 3: (a) Radiance spectrale solaire lors de l'utilisation du film Astrosolar™ de densité 5. La courbe est relative à des observations en basse altitude [9]. La

surface intégrée sur le domaine spectral IR de 700 à 1400 nm indique une radiance de 76 mW/m<sup>2</sup>. (b) Graphique similaire au précédent, mais se rapportant au filtre au chrome. L'intégrale sur le même domaine spectral conduit à une radiance de 352 mW/m<sup>2</sup>.

Si le Soleil est observé au moyen d'un instrument la radiance au niveau de la cornée oculaire peut être sensiblement plus forte. Tout dépendra de l'optique considérée. La pupille de sortie du système « objectif-oculaire » est égale à  $D/G$ , où  $D$  représente le diamètre de l'objectif et  $G$  le grossissement, qui est donné par le rapport des focales entre objectif et oculaire. Si le diaphragme de l'oculaire est suffisamment grand, la radiance en sortie d'oculaire vaudra la radiance à l'entrée de l'objectif multipliée par  $G^2$ . Pour mieux quantifier cette augmentation de radiance, un exemple concret est le plus approprié. L'instrument considéré est un Celestron C8 avec un oculaire de 26 mm Plössl. Le diamètre de l'objectif est de 203 mm et son rapport d'ouverture est de  $f/10$ . La grandeur du disque solaire au foyer sera d'approximativement 18 mm. L'oculaire produira un grossissement  $G = 78$ . Le diaphragme de l'oculaire est de 22 mm, ce qui est supérieur au 18 mm du disque solaire au foyer. Le champ apparent sera de 46° et l'ensemble du Soleil sera visible dans l'oculaire. Dans ce cas, la radiance au niveau de la cornée sera amplifiée d'un facteur 6100 par rapport à la radiance entre le filtre solaire et l'objectif. En reprenant les radiances mentionnées précédemment pour des lieux situés en basse altitude, la radiance après l'oculaire, en cas d'utilisation du système indiqué ci-dessus, s'élèvera à 460 W/m<sup>2</sup> avec le film Astrosolar™ et à 2150 W/m<sup>2</sup> avec le filtre au chrome.

Force est de constater que ces valeurs obtenues dans ces conditions précises sont sensiblement plus élevées que la norme pour l'IR proche fixée à 100 W/m<sup>2</sup>. Cela ne signifie pas pour autant qu'un observateur, ayant observé occasionnellement le Soleil dans ces conditions, sera inéluctablement atteint d'une cataracte. Les seuils de radiances tolérables sont très conservateurs afin de limiter le risque à un niveau très bas. Cependant, il ne faut pas verser dans l'autre extrême et négliger toute prescription de sécurité.

Ces mesures montrent qu'un filtre convenant à un petit instrument peut devenir dangereux en cas d'utilisation avec un instrument de grand diamètre. Le diamètre maximal admissible de l'instrument se calcule facilement si les propriétés du filtre solaire utilisé sont connues.

## 7. La solution de sécurité

En cas d'utilisation du filtre parfaitement caractérisé, il est possible de connaître les configurations optiques potentiellement dangereuses. Si, par contre, des éléments informatifs manquent ou si un doute subsiste, il est préférable de s'affranchir de la grande partie de ces rayonnements invisibles, car des moyens extrêmement simples existent! Pour l'astronome amateur, le rayonnement en dehors du spectre visible n'apporte de

toute manière aucune information supplémentaire, il ne peut que s'avérer néfaste. Il est donc préférable de le réduire de plusieurs ordres de grandeur. Cela est possible tout en laissant le spectre visible quasi inchangé. La méthode consiste à utiliser des filtres IR très répandus sur le marché. Les deux modèles proposés ici sont le B+W 486 produit par la firme Schneider Optics et le BG 39 de la firme Schott. Le premier est un filtre de réjection UV et IR, alors que le second, nettement moins onéreux, bloque essentiellement le rayonnement IR. Ces filtres ont été caractérisés avec la même instrumentation que pour les filtres solaires (Fig.4). Le B+W 486 est un filtre interférentiel, ce qui permet d'obtenir des flancs de transition raides. D'aspect, il ne produit aucune teinte particulière de l'image. L'atténuation des UV et des IR proches est très efficace. La forte transmission des IR plus lointains n'est pas gênante en raison du profil du spectre solaire. Ce filtre est utilisé en imagerie électronique (senseurs CCD et CMOS), pour éviter la perte de résolution liée au rayonnement IR. En effet, les photons d'énergie correspondant à l'IR proche créent des charges en profondeur dans le silicium. Ces charges n'étant plus forcément récupérées par un pixel bien défini produiront une image peu nette. Le filtre BG 39 est de génération plus ancienne. Médiocre pour le filtrage des UV, il coupe très efficacement les IR. Il présente par contre une teinte bleue, qui n'est pas gênante pour l'imagerie solaire. Quel que soit le filtre additionnel utilisé, il faut préciser qu'il n'est nullement nécessaire de le placer devant l'objectif. Un positionnement devant l'oculaire est parfaitement adéquat, car la grande partie de l'énergie est rejetée par le filtre solaire principal. Cette solution est ainsi financièrement très avantageuse.

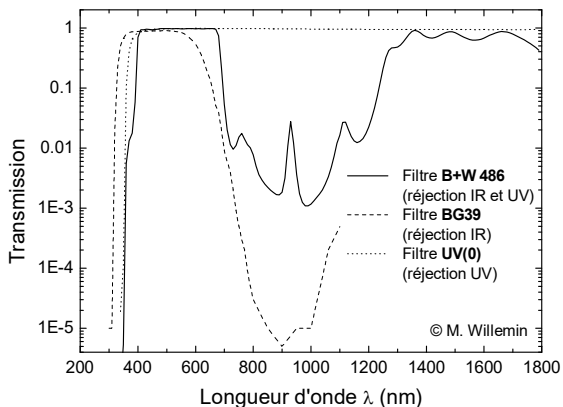


Figure 4 : Transmission spectrale des filtres additionnels B+W 486 et BG 39. Leur absorption des IR proches est très efficace. Le B+W 486 présente l'avantage d'absorber également les UV. A titre d'information et de comparaison, la transmission spectrale d'un filtre UV(0) photographique a aussi été mesurée. Son absorption IR est quasi nulle.

De la combinaison du film Astrosolar™ de densité 5 avec le filtre additionnel B+W 486 résulte une transmission spectrale nettement plus idéale (Fig.5). La partie visible

du spectre reste inchangée, alors que l'efficacité de filtrage des IR proches est améliorée d'environ deux ordres de grandeur.

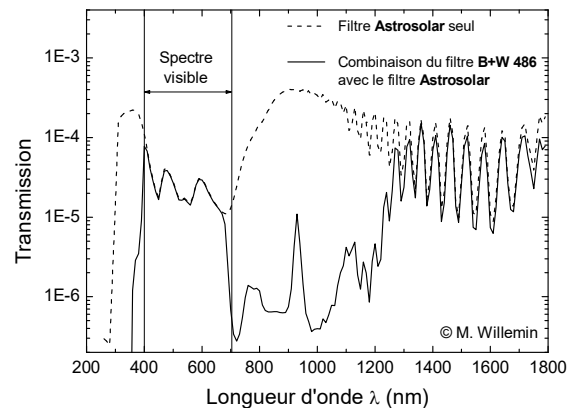


Figure 5 : Le comparatif entre les transmissions spectrales du film Astrosolar™ de densité 5 seul et de la combinaison de ce même filtre avec le filtre interférentiel B+W 486 est spectaculaire.

## 8. Conclusion

La qualité de la protection oculaire lors de l'observation solaire se voit nettement améliorée grâce à un petit filtre additionnel, éliminant efficacement le rayonnement IR proche. Cette méthode est vivement recommandée avec chaque filtre solaire présentant un doute quant à ses propriétés de transmission hors du spectre visible ainsi que pour des filtres atténuant insuffisamment les IR lors de leur utilisation avec de relativement grands instruments. L'exemple du filtre Astrosolar™ a été traité en détail, car il est extrêmement répandu dans le milieu de l'astronomie d'amateurs. Il a été démontré que ce filtre, de qualité optique excellente et parfaitement sûr en cas d'utilisation avec de relativement petits instruments, peut nécessiter un filtre IR additionnel avec de plus grands télescopes. Le principe reste évidemment le même pour d'autres filtres. Le filtre au chrome, testé de manière analogue, s'est avéré environ 5 fois moins opaque aux IR proches que le film Astrosolar™. Les prescriptions de sécurité indiquent un seuil de 100 W/m<sup>2</sup> pour le rayonnement IR proche pénétrant l'œil humain. Pour des observations occasionnelles, une radiance même supérieure d'un ou deux ordres de grandeur à ce seuil pourra être bien tolérée par l'œil. En cas d'observations plus fréquentes, comme pour le comptage journalier de taches solaires, la puissance du rayonnement IR devrait être plus strictement contrôlée.

En cas de doute ou de sentiment d'insécurité de l'observateur à ce sujet, l'emploi d'un filtre anti-IR, bien que simple et peu onéreux, règle définitivement ce problème à conséquences potentiellement fâcheuses sans nuire à la qualité de l'image. En outre, ces rayonnements solaires invisibles qui n'apportent aucune information supplémentaire à l'amateur et qui peuvent se révéler néfastes dans certaines conditions, sont de toute manière à éliminer en cas d'imagerie électronique du

Soleil. En effet, le fort rayonnement IR pourra conduire à des images floues si la caméra électronique ne dispose pas de filtre de réjection IR.

## 9. Références

- [1] Le grand atlas de l'astronomie, Encyclopædia Universalis, (1986).
- [2] Astronomia, Le ciel dans l'histoire, Edition Fabbri, (1995).
- [3] Sun, Earth and Sky, K. R. Lang, Springer Verlag, (1995).
- [4] Guide to the Sun, K. J. H Phillips, Cambridge University Press, (1992).
- [5] Environmental Vision, *Interactions of the Eye, Vision, and the Environment*, D. G. Pitts and R. N. Kleinstein, Butterworth-Heinemann, (1993).
- [6] Evaluation of Optical Radiation Hazards, D. H. Sliney and B. C. Freasier, *Applied Optics*, 1, 12, (1973).
- [7] Solar filter safety, B. R. Chou, *Sky and Telescope* (2000); A new standard in solar filter, B. R. Chou, *Sky and Telescope*, (2000).
- [8] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) Guidelines, Guidelines on limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0.38 to 3  $\mu\text{m}$ ), *Health Physics*, 539, 73, (1997).
- [9] Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Program. Data taken at the central facility of the Southern Great Plains (SGP) site on April 23, 1996. <https://www.arm.gov/>
- [10] World Radiation Center (WRC), Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos (Switzerland); WRC Reference Spectrum, Ch. Wehrli, PMOD publication 615 (1985). <https://www.pmodwrc.ch>.

## Coordonnées des auteurs

Dr. Michel Willemin  
Chemin des Alouettes 6  
CH-2515 Prêles  
E-mail: [michel@willemin.li](mailto:michel@willemin.li)  
URL: <https://www.willemin.li/>

Dr. Raoul Behrend  
Observatoire de Genève  
CH-1290 Sauverny  
E-mail: [raoul.behrend@unige.ch](mailto:raoul.behrend@unige.ch)  
URL: <http://obswww.unige.ch/~behrend/>

Première publication le 23 octobre 2000  
Dernière révision le 14 février 2022