

# Préface

## "Soleil, source éblouissante de la lumière..."

"Source éblouissante de la lumière, de la chaleur, du mouvement, de la vie et de la beauté, le divin Soleil a, dans tous les siècles, reçu les hommages expressés et reconnaissants... ". Voici quelques mots empruntés à Camille Flammarion, livre III de sa célèbre "Astronomie populaire" (1881), qui place cet ouvrage "Astronomie Solaire" dans un contexte resté en réalité tout à fait actuel. Pour preuve récente, l'extraordinaire engouement pour l'éclipse totale "américaine" du 21 août 2017. 350 millions de personnes ont pu assister au phénomène tout en célébrant joyeusement et souvent avec émotion la réapparition de la lumière de notre merveilleuse étoile du jour, tout au moins pour les quelques dizaines de millions d'amateurs qui se sont déplacés pour bénéficier de la totalité. Ils auront admiré l'auréole argentée de la couronne solaire et ses aigrettes et autres plumes polaires, le Soleil étant alors à une phase de son cycle d'activité proche du minimum. Des dizaines de milliers d'amateurs se sont armés de télescopes et de caméras braqués sur le ciel offrant un spectacle surréaliste d'hommage au grand lumineux. Vision moderne d'un culte voué, depuis Zarathoustra, Akhenaton, Inti des Incas et bien d'autres, au Soleil que l'homme ne cesse de surveiller tant il détermine le quotidien, et d'étudier, tant il recèle encore de mystères et même de secrets qu'il serait bon de percer tant ils pourraient être utiles à l'humanité, voir [figure 1](#).

L'étude du Soleil, qui est l'objet de cet ouvrage, est une véritable aubaine pour l'amateur d'astronomie. C'est un astre dont nous recevons sur Terre le jour plus d'un milliard de fois plus de photons que ce que nous recevons la nuit de tous les autres astres réunis du ciel. Même la lumière des planètes et celle de notre compagne céleste la Lune sont d'origine solaire. On pourrait penser que l'étude de toute cette lumière va rapidement permettre de résoudre les questions fondamentales posées, mais c'est ne pas tenir compte des spécificités de ces études sur la seule étoile de l'Univers que nous voyons de près : l'imagerie à haute résolution va permettre d'ausculter dans le détail sa surface ; en dispersant le spectre de la lumière produite par ses éléments de surface et pour diverses positions sur le disque, les différentes couches de son atmosphère se trouvent révélées. Mieux encore, des flots de gaz vont apparaître avec des trajectoires courbées et des oscillations impliquant autant de contorsions sur les profils de raies des différents éléments composant l'atmosphère, gaz légers comme l'hydrogène et l'hélium ou vapeurs métalliques, certes moins abondantes, mais tellement plus porteuses d'informations sur l'état du plasma.

Enfin l'astre est changeant sur de grandes échelles de temps, et variable en surface aux petites échelles de temps. Dans les détails qu'il est aujourd'hui possible d'appréhender avec des images successives et des cadences élevées, des phénomènes complexes de rotation différentielle, de convection, d'éruption, d'explosion et d'éjection vont s'offrir au regard de l'observateur médusé. À la réflexion, il devient avide d'en connaître plus, ce qui est aujourd'hui possible grâce à la panoplie d'instruments et de caméras qui s'offre à lui. Néanmoins, une limitation fondamentale devient rapidement gênante à cause du voile de l'atmosphère terrestre qui nous entoure et nous protège d'ailleurs de certains rayonnements nocifs du Soleil. Même à haute altitude, où des couches d'air moins absorbantes s'étalent, la turbulence de l'air est toujours développée et cela jusqu'à des altitudes très élevées dans la stratosphère. L'amateur avancé sait en réduire partiellement, et même substantiellement, les effets, mais c'est là tout un art abordé dans cet ouvrage qui nous plonge alors dans les arcanes du numérique et des logiciels avec des moyens de calcul qui augmentent presque chaque jour. Jusqu'à quand ?

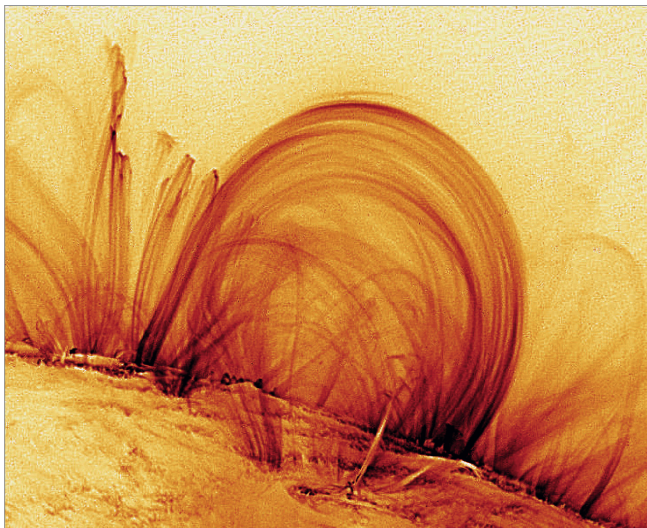
## L'observation du Soleil depuis l'espace

La physique solaire professionnelle a contourné depuis longtemps ces difficultés, à grand renfort de crédits colossaux délivrés à la conquête spatiale et à ses applications aujourd'hui étendues aux moyens les plus communs, sans parler de la "défense" dont les systèmes sont quelque peu sujets aux caprices et soubresauts du Soleil. Après quelques tentatives en ballon puis en fusée, des expériences solaires de plus en plus considérables et sophistiquées ont été emportées sur orbite terrestre et même plus loin.

Vers la fin des années 1970, un formidable laboratoire solaire a fonctionné durant plusieurs années à bord de Skylab (NASA) grâce à plusieurs équipages compétents d'astronautes. Ces observations ont ouvert définitivement des fenêtres spectrales nouvelles vers l'ultraviolet (UV) et les rayons X, mais aussi vers l'imagerie profonde de la couronne solaire, bien au-delà en distance radiale de ce que permettait, au sol, le coronographe de Lyot. Immédiatement plusieurs grandes découvertes ont été enregistrées, notamment dans les couches plus élevées que la chromosphère. C'était néanmoins encore l'époque des émulsions photographiques, des évaluations quasi visuelles, des détecteurs ponctuels et des scanners à un seul pixel dirait-on aujourd'hui.



**1** Bas-relief exposé au musée du Caire représentant le pharaon Akhenaton et son épouse Néfertiti vers -1350. C'est lui qui imposa à son peuple le disque solaire comme seule divinité à honorer ou comme seul dieu universel. Le Soleil se voyait alors attribuer des pouvoirs bienfaisants étendus, symbolisés ici par des rayons malins. Image musée du Caire.



**2 Boucles coronales observées en négatif dans l'extrême ultraviolet (émissions EUV du Fe IX à 171 Å) avec le télescope à quatre quadrants de la mission TRACE. C'est sans doute la meilleure image de la collection. Ces structures étaient autrefois observées au coronographe de Lyot dans les raies du Fe X et du Fe XIV avec une moins bonne résolution. Elles étaient appelées condensations coronales. La structure fine des boucles, suggérant des sections de tube de flux magnétique de section à peu près constante, ne manque pas d'étonner, car on s'attendait à voir des sections croissantes avec l'altitude à cause de la conservation du flux magnétique et de la décroissance de l'amplitude du champ. Ces boucles se forment après un flare et s'appellent également "boucles post-flare". Elles sont visibles durant plusieurs heures, y compris en émission dans les raies de l'hydrogène et de l'hélium. Image traitée tirée des archives de la mission TRACE de la NASA.**

Plus tard avec SolarMax, emporté par la navette spatiale, puis avec les sondes réutilisables SPARTAN, des détecteurs plus performants ont été mis en œuvre sur des expériences robotisées. Le laboratoire automatique SolarMax s'est spécialisé dans l'étude des flares solaires jugés dangereux pour la survie des cosmonautes, avec un succès mitigé en partie dû à des réparations ayant nécessité l'intervention humaine sur le satellite...

Avec la mission YOHKOH mise en œuvre essentiellement par l'Agence spatiale du Japon JAXA, l'ère de l'imagerie numérique s'ouvrait alors avec des millions d'images dans le rayonnement X retransmises.

Mais c'est la fameuse mission SoHO, d'abord européenne, devenue ensuite euro-américaine (ESA-NASA) en grandissant jusqu'à la taille d'un minibus bardé d'instruments sophistiqués, tous plus précis les uns que les autres, qui a marqué en 1996 le début d'une véritable épopée solaire qui perdure encore en partie aujourd'hui. L'étude moderne et numérique du Soleil s'ouvrait avec ses nombreux diagnostics spectroscopiques dans les ultraviolets et les ultraviolets extrêmes (EUV), y compris avec des mesures spectropolarimétriques dans le visible. SoHO a fourni depuis son lancement des millions de magnétogrammes du disque entier, des gigaoctets de mesures photométriques extrêmement précises, une imagerie EUV du disque devenue légendaire et une coronographie étendue à plusieurs rayons solaires, découvrant accessoirement les périple de milliers de comètes rasantes. Des éruptions géantes poussant des nuages menaçants de plasma magnétisé vers le milieu interplanétaire pouvaient être suivies en continu 24h sur 24, ce qui était totalement nouveau. Après plus de 20 ans d'observations continues, cela s'avère également fondamental quand des variabilités comme l'irradiance et les flares doivent être analysées. En 1998, la NASA lançait avec l'aide de Lockheed aux Etats-Unis, une mission moins ambitieuse, TRACE, qui a permis avec un télescope solaire de 30 cm de diamètre, inspiré de l'imageur EIT à 4 quadrants de SoHO, de collecter un nombre incalculable d'images EUV très intéressantes et montrables en séquences accélérées (voir figure 2).

Les champs étaient néanmoins limités sur le disque solaire ; la mission a duré une douzaine d'années, sans pour autant faire avancer de manière vraiment définitive nos connaissances de 2010, car il y manquait au moins les diagnostics spectroscopiques. La haute chromosphère a donc pu être imagée en profondeur, pour y étudier le mystère du chauffage coronal qui part de cette région de l'atmosphère solaire où la température augmente brutalement de plusieurs ordres de grandeur, et qu'on a appelée la région de transition. La physique est incapable d'expliquer ce qui est observé et seul un dessin (voir figure 3), peut tenter de rendre grossièrement compte de cette région si complexe à appréhender car hors équilibre. Perpétuellement traversée par des ondes et des flots de gaz plus ou moins ionisés et soumise aux contorsions du champ magnétique émergent de la photosphère, elle produit un spectre d'émission très riche en raies.

Sans surprise, la mission TRACE a partiellement servi de prototype à d'autres missions très importantes de la NASA. Par ailleurs dès 2006, l'agence japonaise JAXA épaulée par la NASA dans un effort transpacifique, lançait l'observatoire solaire orbital dit Solar B, rebaptisé HINODE (lever de Soleil) après les manœuvres réussies de qualification sur orbite. L'ensemble comportait :

- un nouvel imageur X (expérience XRT), conçu partiellement par le groupe de Harvard-Smithsonian pour offrir une résolution supérieure à celle de l'imageur X de YOHKOH,
- un spectromètre à balayage EUV (expérience EIS), conçu en partie en Grande-Bretagne,
- et surtout un télescope visible SOT (Solar Optical Telescope) de 50 cm de diamètre, dont le miroir primaire quasi parfait a été fabriqué en France.

Le télescope et les instruments focaux ont été conçus chez Lockheed (Californie) et par les équipes de Mitaka (Tokyo) et la JAXA.

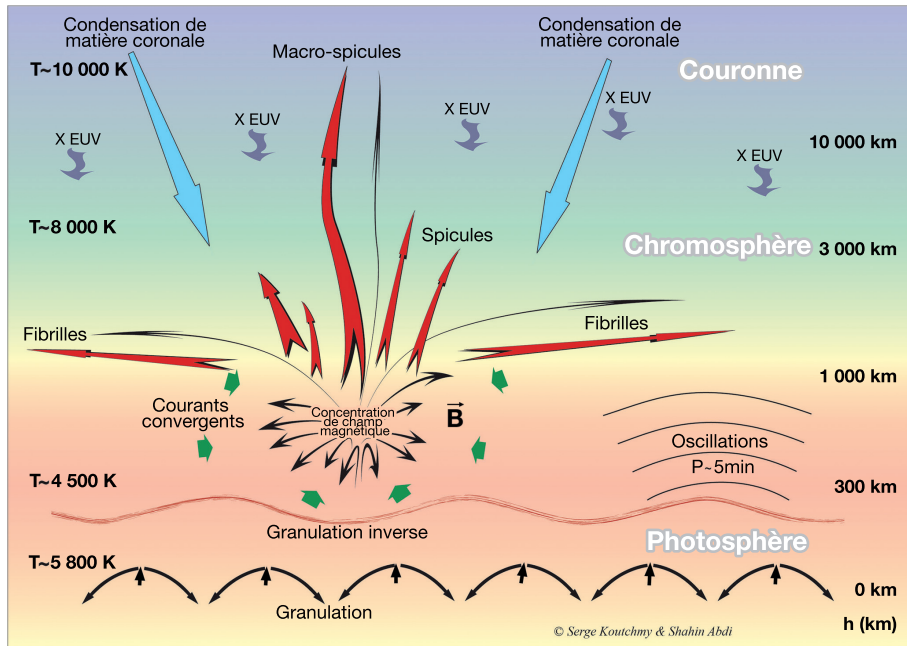
Le SOT a donné les meilleures images du Soleil jamais obtenues alors, particulièrement dans le proche UV. C'est en fait le plus grand télescope solaire encore en orbite. Avec ses instruments focaux élaborés, comme un spectro-magnétographe vectoriel haute résolution (les trois composantes du champ magnétique sont mesurées au niveau de la haute photosphère vers 200 km de hauteur, voir figure 3) et des caméras CCD équipées de filtres interférentiels étroits, une surprenante moisson d'images, de magnétogrammes et de dopplergrammes a été engrangée. De plus des images en accéléré montrant les spicules et les protubérances sous un jour nouveau, grâce à un grand luxe de détails, ont fait l'objet d'études poussées permettant de fertiliser des travaux théoriques encore inachevés. Vortex et ondes d'Alfvén sont maintenant observés. Les images du disque solaire (par exemple figure 4) et les étonnants magnétogrammes vectoriels obtenus par le SOT ont tout à coup rendu quelque peu caduc tout ce qui se faisait alors de mieux, au sol, en résolution spatiale, et certains observateurs n'en sont pas encore revenus. Le succès de cette mission qui perdure encore en 2018, aurait dû permettre de convaincre les agences spatiales de financer un nouveau SOT orbital de 1 m de diamètre. Pour l'instant, ce projet proposé en effet de longue date aux États-Unis et en Chine, est estimé trop cher et par conséquent gelé. En Europe, un programme d'observation en ballon appelé SUNRISE a été développé avec un télescope solaire similaire de 1 m. Il a été lancé avec succès en 2009 et 2013, le 3ème vol étant en préparation pour 2024. Ce projet implique des laboratoires en Allemagne, au Japon, en Espagne et aux États-Unis.

Parmi les découvertes inattendues de la mission spatiale SoHO, les CMEs (Coronal Mass Ejections) ont joué un rôle important dans la suite des événements, avec la naissance d'une nouvelle discipline solaire, la météorologie de l'espace et l'émergence de son pendant certes plus scientifique, l'héliophysique.

Il est à noter que l'une des composantes du rayonnement solaire hautement variable et super énergétique est étudiée dans le domaine des X durs et des gammas. Une mission dédiée, RHESSI, a été lancée en 2002 par la NASA pour pointer le Soleil en permanence. De nombreux "spectres" et images à basse résolution ont été analysés depuis, complétant les diagnostics radio portant sur les mêmes événements énergétiques.

La physique solaire intéresse fortement géophysiciens et climatologues. Il n'est pas inutile de se rappeler ici que la mission SoHO avait été





**Notations :**

- $\bar{T}$  : température moyenne de la région de la chromosphère. Les zones où la température locale est supérieure à  $\bar{T}$  correspondent aux points brillants de la chromosphère.
- Les flèches vertes, au-dessus du minimum de température à 4500 K, indiquent des flots de gaz qui compriment la structure. C'est la région d'où partent les spicules et les fibrilles, et au-dessus de laquelle la température remonte.
- Les lignes noires représentent les lignes de force magnétiques qui guident les flots spiculaires, y compris vers la couronne.
- Les flèches bleues descendantes dans la couronne indiquent des flots de gaz qui se refroidit et qui s'écoulent par gravité le long des lignes de force jusqu'au sommet de la chromosphère.

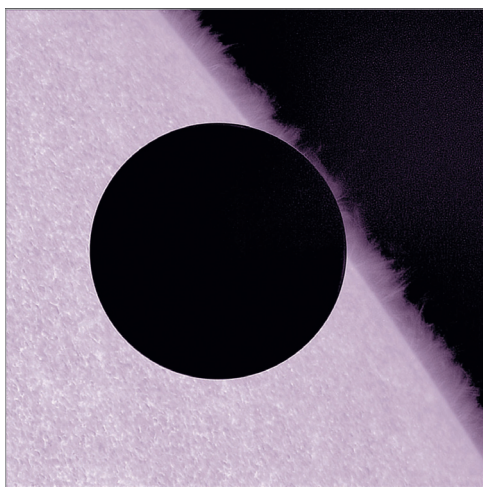
**3** Coupe schématique de l'atmosphère solaire, depuis la photosphère (hauteur 0) jusqu'à la base de la couronne. Notez l'échelle logarithmique des hauteurs, indiquées en km à droite (par comparaison 1sec = 720 km au centre du disque solaire). Les altitudes successives correspondent à :

- La photosphère en jaune, peuplée de granules éclatant perpétuellement à la surface.
- La région mésosphérique en orange, située au minimum de température vers 500 km. Cette couche est abondante en éléments "low FIP" (First Ionization Potential), qui sont des éléments, comme le FeII, le BaII, le TiII, le MgII, etc., qui ont un premier potentiel d'ionisation inférieur à 10 eV et qui se trouvent ionisés dans cette couche. Les éléments les plus abondants, comme l'hydrogène et l'hélium, restent à l'état neutre et ne seront ionisés que plus haut à la faveur d'une remontée de la température dont l'origine est inconnue.
- La chromosphère, où cette température remonte et où émerge le champ magnétique du réseau chromosphérique, est en jaune puis en vert. Le champ magnétique remplit tout l'espace. Les lignes de force s'étalent horizontalement vers 1000 km d'altitude (la "canopée" magnétique) dans toutes les couches devenues hétérogènes (elles sont traversées par des fibrilles plus denses et moins chaudes, en rouge) et plus dynamiques (oscillations et chocs) de la base de la chromosphère.
- Plus haut, jusqu'à environ 5000 km, l'enveloppe ténue chromosphérique est traversée par les nombreux spicules plus denses (en rouge) propulsés en hauteur par des forces thermomagnétiques s'opposant à la force gravifique, puis par les macro-spicules beaucoup moins nombreux propulsés encore plus haut (spicules géants avec des températures voisines de 100 000 K) dans une couronne encore plus ténue (en bleu clair) où la température atteint 1 million de K et plus, sans qu'on sache pourquoi.
- Enfin des vitesses descendantes impliquant peut-être de la condensation du gaz ionisé de la couronne, sont observées spectroscopiquement à la base de la couronne (région dite de transition), en même temps que des photons X-EUV et des flux d'électrons énergétiques en provenance de la couronne environnante "arrosent" la surface.

Source : Serge Koutchmy et Shahin Abdi (Institut d'Astrophysique de Paris - CNRS et Sorbonne Université).

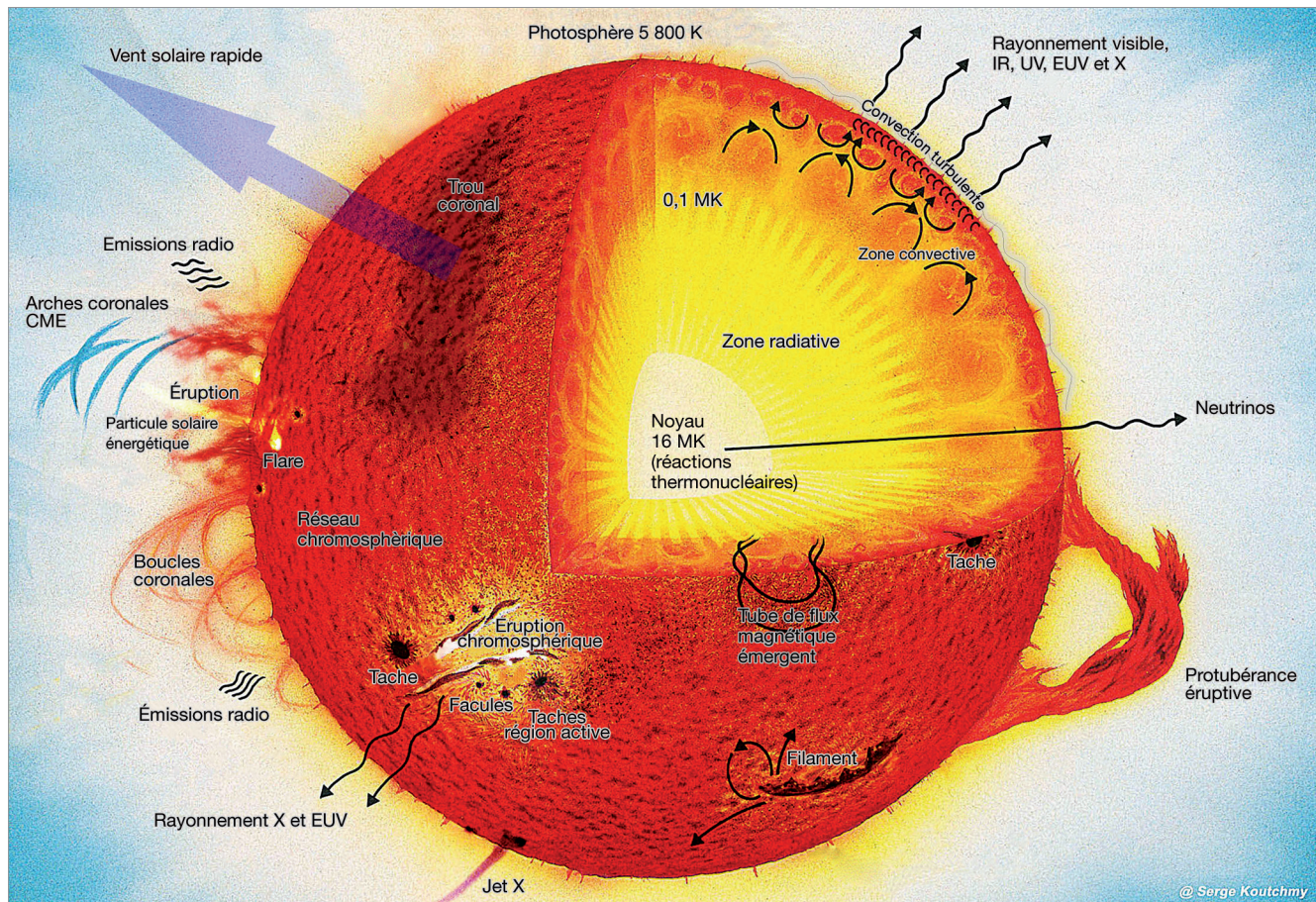
définie par ses promoteurs comme une mission "Soleil calme" sous-entendant une certaine constance et stabilité de l'étoile, pour étudier essentiellement sa structure interne et son atmosphère par les méthodes de la sismologie solaire et durant le minimum d'activité. Quel renversement des choses s'est opéré pour que cette mission se soit transformée en une très belle mission de maximum d'activité, avec le succès que l'on connaît aujourd'hui ? C'est un mystère dont seul notre astre a le secret.

L'activité solaire est en réalité bien omniprésente à tout moment, **violentes éruptions des régions actives et flots rapides du vent des trous coronaux polaires** en sont une des preuves les plus évidentes. Pour l'instant, toutes les facettes de cette activité ne nous sont pas encore connues, même si on se doute bien aujourd'hui que le magnétisme, sous-jacent à tous les stades des manifestations de l'activité, est une source



**4** Image déconvoluée par la PSF (Point Spread Function), obtenue avec le télescope SOT de la mission HINODE lors du passage devant le disque solaire de la planète Vénus, en 2012 (diamètre angulaire de Vénus environ 60"). Le filtre utilisé est centré sur la raie CaII H (bande passante de 0,4 nm) ce qui permet d'étudier les spicules sur le limbe solaire. La résolution après traitement est voisine de 0,15 arcsec sur tout le champ, du fait de l'absence de turbulence dans l'espace. La frange de la forêt de spicules nécessite un traitement à part pour distinguer les structures séparément. L'atmosphère de la planète Vénus est visualisée sur cette image pour la première fois en entier, avec le fameux arc lumineux visible en dehors du disque solaire. Cet arc, mentionné par M. Lomonossov lors du transit de 1761 observé visuellement, est produit par la réfraction et la diffusion des rayons solaires au travers des hautes couches de l'atmosphère vénusienne. Sur le disque solaire, les structures proches du limbe sont des réminiscences de la granulation inverse (voir figure 3). L'effet Gibbs produit par une déconvolution exagérée semble très réduit ici, comme en témoigne l'absence de signal sur le disque de la planète après déconvolution. Image de H. Goodarzi et S. Koutchmy (2016) utilisée pour déduire la PSF du télescope et étudier taches solaires, bord, facules et granulation.





**5** Représentation très schématique de la structure interne connue du Soleil et des principales structures et phénomènes observés à sa surface et au-delà. Ni les intensités, ni les couleurs, ni les échelles ne sont respectées sur cette tentative de représentation synthétique de l'astre Soleil. Les labels se rapportent à des parties ou des processus assez bien identifiés dans les détails par la littérature scientifique. La granulation et les spicules chromosphériques ne peuvent être représentés à cette échelle (voir figure 3). Les protubérances et les filaments sont des éléments relativement froids (hydrogène et hélium partiellement ionisés) immergés dans une couronne chaude ambiante. Dans ces régions, les boucles et les renforcements coronaux (voir figure 2) sont encore plus chauds et produisent ainsi des rayonnements dans l'extrême ultraviolet (EUV) et même à profusion dans les X et la radio. Les taches solaires peuvent être isolées ou en groupe pour former une région active qui, en évoluant, peut ou non produire des flares (fortes émissions paroxysmiques EUV, X et gamma, radio) pouvant être précédés par des éruptions (brusque déplacement, instabilité et éjection) de matière froide qui va s'ioniser et produire des éruptions de masses coronales (CMEs) dans la couronne environnante. Source : Serge Koutchmy.

inépuisable de phénomènes énergétiques dans tous les plasmas cosmiques, à commencer par le Soleil et sa couronne.

Un programme spatial ambitieux à 10 milliards de dollars a été rapidement adopté par la NASA pour répondre aux besoins de l'espace après SoHO, faisant écho à des besoins quelque peu ancestraux, induits notamment par la dangerosité des radiations solaires et ses variabilités. Appelé "vivre sous une étoile" ("Living With a Star" ou LWS), ce programme perdure encore et son prolongement au-delà de 2020 est âprement disputé, y compris dans le cadre de la compétition avec la conquête de Mars et les projets de recherche d'exoplanètes. Plusieurs nouvelles missions solaires ont déjà été lancées dans le cadre de ce programme LWS et les agences japonaises et européennes y prennent part.

Ainsi, la mission STEREO lancée en 2006, composée de deux sondes jumelles, emporte des coronographes et des imageurs EUV semblables à ceux de SoHO. Placées en orbite autour du Soleil, elles offrent une vision stéréoscopique de l'activité solaire depuis sa surface jusqu'à très loin dans son atmosphère extérieure (expérience HI). Les nombreuses images collectées sont encore évaluées. Hélas, après une demi-orbite autour du Soleil, l'une des sondes a péri lors du passage derrière le Soleil. L'autre sonde continue d'envoyer des images qui, comparées à celles qui sont prises par les satellites autour de la Terre, permettent une bonne surveillance de l'activité qui traverse l'atmosphère solaire et le milieu interplanétaire.

Mais une surveillance beaucoup plus poussée en résolution spatio-temporelle est nécessaire pour espérer prévoir flares et éruptions. C'était l'objet de la mission SDO (Solar Dynamics Observatory) lancée en 2010, qui a été rendue possible grâce à d'énormes avancées technologiques et au retour d'expérience de certaines expériences très réussies de SOHO. Cette mission constitue pour l'instant le fleuron américain des observatoires solaires sur orbite polaire. SDO est ainsi une mission satellite assez complète dont la description demanderait un rapport complet pour en rendre compte, tant elle comporte de facettes. Seule la spectroscopie y manque.

Depuis, en 2013, une mission moins importante a été mise sur orbite, IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph), avec un spectrographe permettant d'appréhender la région de transition et la chromosphère sur de tous petits champs, avec une très grande résolution spatiale (1/3 arcsec) et temporelle (1 s).

SDO fournit également des images de disque solaire avec une définition de 2000 x 2000 pixels dans dix longueurs d'onde différentes de l'EUV, avec une échelle de 0,7 arcsec/pixel et une cadence d'une image toutes les 10 s (images AIA), et un magnétogramme du disque solaire à une résolution de 1 seconde d'arc (images IHM). Ces images montrent continuellement tous les détails de la surface et les nombreuses couches successives qui s'étendent au-delà, jusqu'à la couronne, avec toute la complexité imposée par l'émergence puis la dominance du champ magnétique à toutes les échelles, champs induits par des millions de phénomènes de dynamos locales opérant sur toute la surface. Sans compter évidemment taches et régions actives ancrées profondément dans l'atmosphère et créant des édifices magnétiques majestueux mais souvent instables dans la couronne, y compris à la faveur de distorsions de surface



résultant de la rotation différentielle. Des événements paroxysmiques que sont les flares éclatent dans la couronne tout près de la surface (voir [figure 5](#)). Enfin, la physique des "jets X" découverts avec YOHKOH, en complément avec les macro-spicules de SKYLAB, les anciens "spikes" des images d'éclipses totales, et le phénomène "tornado" mis en évidence avec AIA de SDO, commence à être révélée et ne cesse d'alimenter les recherches des théoriciens.

Il devient de plus en plus évident que des mécanismes dissimulés, opérant aux échelles encore inaccessibles à l'observation, jouent un rôle fondamental. Ils sont très souvent décrits par des reconnections magnétiques, sans qu'aucun diagnostic évident sinon définitif ne puisse être proposé à l'observateur, car ce sont les courants électriques qui se dissipent et échappent aux investigations. Seuls de nombreux travaux théoriques avec souvent des simulations numériques permettent d'en deviner l'importance et peut-être la topologie. Points singuliers neutres, cisaillements et contre-flots sont par exemple évoqués.

Pour améliorer encore la résolution des images solaires de manière ponctuelle, quelques expériences EUV à bord de fusées sont développées aujourd'hui mais cela est bien insuffisant. Les géophysiciens bénéficient depuis longtemps de mesures "in situ" ; elles leur apportent des mesures précieuses qui substantifient heureusement ces notions de reconnections magnétiques. Europe, Russie et États-Unis ont défini depuis longtemps de nouvelles missions pour répondre à ce besoin d'amélioration décisive de la résolution et faire des mesures *in situ* plus près du Soleil.

C'est en développant des sondes interplanétaires capables de s'approcher du Soleil pour y voir mieux, de manière progressive à cause des contraintes orbitales, et grâce au déploiement d'un bouclier thermique et d'une source d'énergie nouvelle que les progrès arriveront. L'une de ces sondes solaires, issues d'études qui auront duré plus de 40 ans, a été lancée en 2018 par la NASA. Elle a été rebaptisée "sonde Parker", pour honorer un grand physicien solaire du 20ème siècle.

Après 2020, une autre sonde plus ambitieuse sera lancée par l'ESA et la NASA, puis d'autres. Les régions interplanétaires plus proches du Soleil seront mieux analysées mais, en dehors de l'accès à une vision plus "en dehors du plan de l'écliptique", les connaissances sur le disque solaire, sauf découverte inattendue sur les régions polaires du Soleil, n'en seront pas bouleversées. Il faut donc revenir aux méthodes traditionnelles développées depuis longtemps au sol pour espérer d'autres progrès décisifs, grâce à des instruments de plus gros diamètres et à des diagnostics plus étendus y compris dans le domaine synoptique (une carte synoptique identifie tous les phénomènes visibles sur le disque solaire à un instant donné).

## L'observation du Soleil depuis le sol

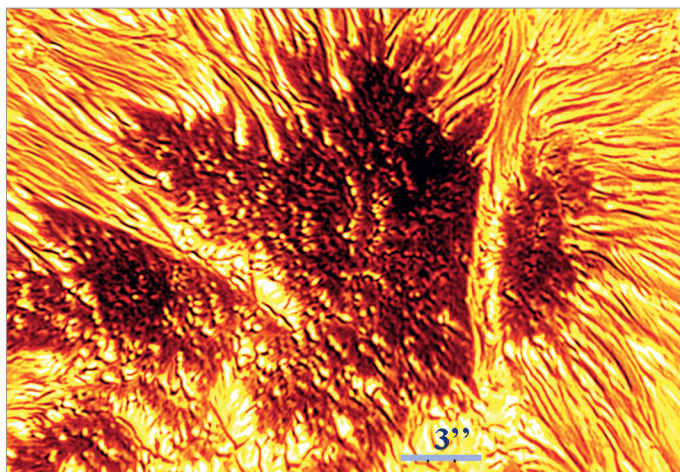
Enfin les moyens "radio" ne peuvent guère être développés qu'au sol ; d'énormes radiotélescopes fonctionnant en réseaux dans de nouveaux sites de haute altitude (projet ALMA notamment, Atacama Millimeter/sub Millimeter Array) doivent apporter bientôt du nouveau sur la chromosphère et la basse couronne avec une excellente résolution.

Il est donc important de se souvenir que les observations au sol demeurent et sont nécessaires. Dans l'espace les expériences ne sont pas parfaitement pérennes et vieillissent d'ailleurs plus vite qu'au sol à cause des rayonnements intenses du Soleil et des rayons cosmiques omniprésents dans l'héliosphère. Elles peuvent aussi périr à cause de manœuvres orbitales mal contrôlées. Enfin, le kg d'instruments coûte très cher à mettre sur orbite et à faire fonctionner.

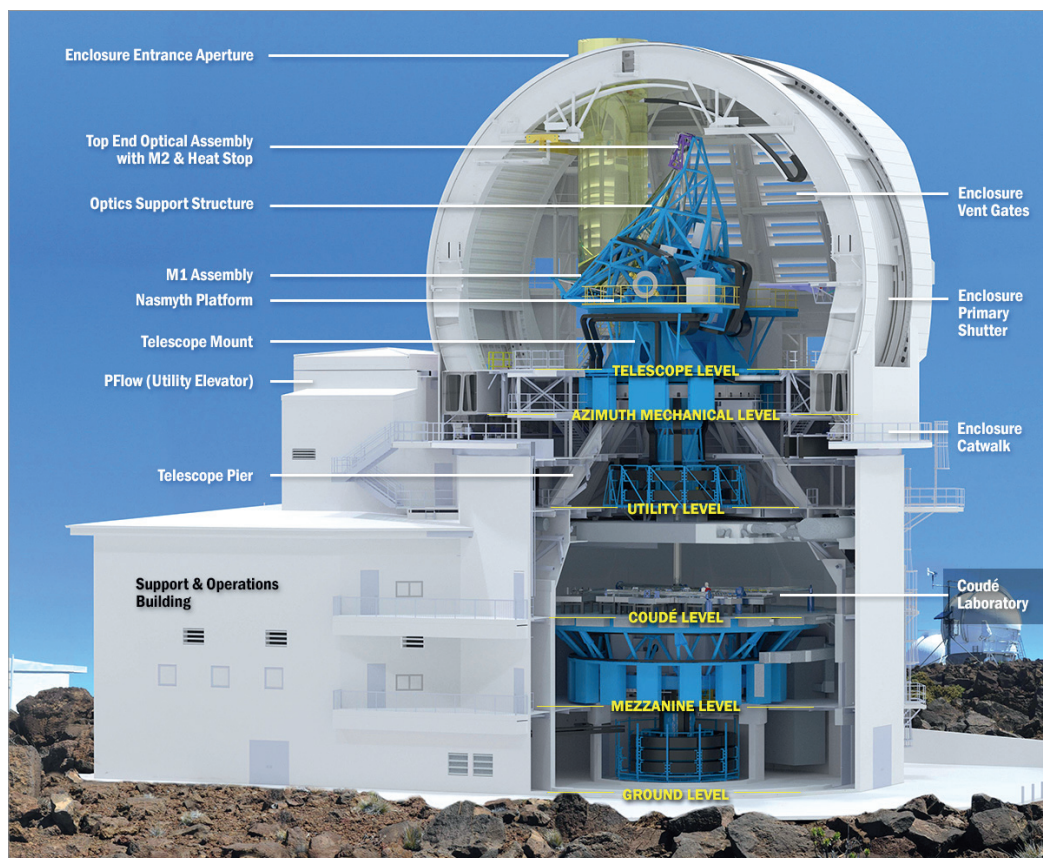
Au sol des télescopes solaires de gros diamètre (miroir primaire > 1 m) ont déjà été développés, et grâce aux progrès de l'optique adaptative (OA) et des systèmes numériques de contrôle et d'enregistrement, la résolution atteint déjà des records proches de 0,1 arcsec (voir [figure 6](#)). C'est le cas du Goode Solar Telescope de 1,6 m d'ouverture de miroir primaire, érigé à l'Observatoire de Big Bear en Californie (BBSO) qui utilise un système d'OA comportant 357 actuateurs déformant le miroir souple correcteur de surface d'onde avec une fréquence voisine de 2 000 Hz.

Les observatoires allemands ont également installé aux Canaries le télescope GREGOR de 1,5 m d'ouverture avec leur propre OA. De belles images commencent à être diffusées et des phénomènes nouveaux sont découverts aux toutes petites échelles, y compris dans la raie H $\alpha$ . La turbulence atmosphérique n'est pas complètement maîtrisée mais l'énorme quantité de photons disponibles au foyer permet d'opérer très rapidement et répétitivement, même après dispersion spectrale de la lumière sur de tous petits éléments du disque. On peut donc traiter par paquets des centaines d'images par seconde, quasi monochromatiques, avec un bon rapport signal/bruit (S/B), un peu comme savent le faire beaucoup d'amateurs. Ce rapport S/B est déterminant pour améliorer la résolution, sauf que la distorsion persistante des images limite les performances à des champs peu étendus sur le Soleil.

En dehors de l'observation du disque solaire, la situation n'est pas aussi idyllique. Comme pour les observations nocturnes, c'est en allant vers des longueurs d'onde plus longues, vers l'IR, que des progrès sont encore possibles. C'est en partie le pari fait par les promoteurs du plus grand télescope solaire jamais conçu, le DKIST (nommé ainsi pour honorer le sénateur hawaïen décédé qui a soutenu de manière décisive le projet sur le site de l'île de Haleakalā qui appartient à l'archipel d'Hawaï). Ce télescope sera le fleuron de l'astronomie solaire américaine et peut-être internationale, avec son miroir primaire de quatre mètres de diamètre, sa configuration "hors-axe", favorable aux recherches sur la couronne solaire grâce à son faible taux de lumière parasite dû à l'absence de toute obstruction centrale, sa coupole très étudiée pour réduire les turbulences et enfin, une "suite" d'instruments



**6** Une des meilleures images jamais réalisées montrant l'ombre d'une tache solaire obtenue avec un filtre proche infrarouge TiO, au foyer du télescope NST de 1,6 m d'ouverture de BBSO. La molécule TiO absorbe une partie de la lumière provenant de l'atmosphère solaire profonde, ce qui permet d'augmenter un peu les contrastes par rapport aux images prises dans le continu. Jusqu'à fin 2019, le NST était le plus grand télescope solaire en opération. Il est équipé d'un système d'optique adaptative très élaboré. L'image originale couvre un champ plus grand que celui illustré ici. Les plus petites structures ont des tailles de 0,1 seconde d'arc ou moins (voir l'échelle indiquée en bas de l'image). Dans l'ombre les structures brillantes ont tendance à se retrouver groupées ou alignées ce qui, avec l'analyse des variations temporelles montrant les mouvements propres, donne des indications sur le rôle du champ magnétique omniprésent et vertical dans les parties sombres. Dans la pénombre et les ponts de matière comme à droite, le champ est presque horizontal.  
Source : image traitée utilisant les observations du 22 mai 2013, Big Bear Solar Observatory (BBSO), Californie USA.



**7** *Télescope DKIST de 4 m d'ouverture du National Solar Observatory (NSF-USA). Ce télescope a vu sa première lumière fin 2019. Il est situé à 3000 m d'altitude au sommet du volcan Haleakala, sur l'île de Maui dans l'archipel d'Hawaii. C'est le plus grand télescope solaire jamais développé. La coupole est étudiée pour réduire la turbulence diurne et favoriser les écoulements laminaires. Plusieurs étages sont identifiables sur cette vue éclatée, avec le télescope "off-axis" au centre, en bleu sur sa monture altazimutale. Le télescope est équipé d'un système d'optique adaptative de pointe. Les cinq instruments "de première lumière" incluent un mode coronographique dans l'infrarouge. Source : NSO/AURA/NSF.*

focaux impressionnante. La liste des institutions et universités qui prennent part aux développements instrumentaux montre à l'avance que ce nouveau moyen d'investigation du Soleil, attendu depuis déjà plusieurs décennies, pourra jouer un rôle fondamental dans l'avenir (figure 7).

Par ailleurs, d'autres projets d'observatoires au sol moins ambitieux sont développés de par le monde, en particulier en Europe, mais aussi en Chine et en Inde ; les informations manquent pour en parler.

Il faut signaler le réseau international GONG de petits télescopes distribués autour du globe terrestre, qui est depuis quelques années parfaitement opérationnel. Il fournit à la communauté des "solaires", sur simple interrogation informatique via un observatoire virtuel à NSO-Tucson (USA), 24h sur 24 et pour chaque minute, des images H $\alpha$ , et aussi des magnétogrammes, du Soleil en entier. Incidemment la résolution n'est pas aussi bonne que celle atteinte aujourd'hui par les amateurs, comme le montrent les images de cet ouvrage, et il est prévu d'améliorer les performances (projet SPRING).

## Le monde des amateurs

Le monde des amateurs est devenu très actif aujourd'hui, notamment en France. Des travaux impressionnants sont menés comme en témoigne l'élaboration de cet ouvrage. Il s'agit aussi de traditions bien ancrées dans l'histoire de la physique solaire. Faut-il rappeler que l'une des plus grandes découvertes de la physique solaire du 19<sup>ème</sup> siècle a été faite par un amateur, Heinrich Schwabe, pharmacien à Dessau de son état, qui a établi la périodicité de l'activité solaire par les observations assidues, durant plus de 15 ans, des taches du disque solaire. Il cherchait la planète Vulcaïn qui devait passer devant le disque tout en perturbant l'orbite séculaire de Mercure... Bien plus tard A. Einstein trouva une explication bien plus rationnelle mais c'est une autre histoire !

Il semble néanmoins vain d'opposer professionnels et amateurs. L'important est de trouver de profondes satisfactions personnelles et du plaisir durant les longues journées consacrées à l'étude du Soleil, à condition évidemment de mettre toujours en avant des moyens technologiques à la hauteur de ses ambitions. Le livre consacré à cette discipline par Christian Viladrich et ses coauteurs répond parfaitement à ces critères. Il devrait certes offrir à un public qui s'interroge au quotidien sur le sort de notre étoile et ses soubresauts, de nouvelles "satisfactions solaires" tant il renferme de descriptions, de suggestions, d'interprétations et de réponses. Des compétences complémentaires et étendues ont pu être réunies et mises en exergue dans cette entreprise. Tout le mérite revient à Christian qui nous révèle en l'occurrence l'étendue de ses connaissances d'amateur très pointu et dévoué depuis longtemps à l'observation, en plus de ses qualités d'organisateur et d'animateur doué de pédagogie. Quel bel ouvrage !

**Serge Koutchmy (1940 - 2023)**

Directeur de recherches émérite

Institut d'Astrophysique de Paris, CNRS et Université Sorbonne

Médaille J. Janssen de l'Académie des Sciences (1994), médaille du CNES (1983) et prix Janssen de la SAF (1998).