

A la poursuite du Soleil, de Jules Janssen à nos jours

Par Jean-Marie Malherbe, astronome émérite

Observatoire de Paris (OP), 13 Janvier 2024

Résumé

Le Soleil est observé à la lunette depuis quatre siècles. Cependant, son étude a fait un bond prodigieux à la fin du XIX^{ème} siècle avec l'apparition de la photographie et de la spectroscopie, puis au début du siècle suivant avec l'invention du coronographe et des filtres monochromatiques, et enfin dans la seconde moitié du XX^{ème} avec l'avènement de l'exploration spatiale (satellites, sondes). Celle-ci permet en effet d'observer les rayonnements cachés par l'atmosphère terrestre (Ultra Violet, X, γ) et d'effectuer des mesures « in situ » dans l'environnement solaire. Cet article retrace les grandes étapes de cette fantastique épopée où entrent en scène des savants renommés comme Janssen, Deslandres, d'Azambuja, Lyot ou Dollfus, conférant à l'observatoire de Paris-Meudon un rôle de pionnier dans l'histoire de la physique solaire jusqu'en 1960. Après cet âge d'or, l'exploration spatiale a nécessité de gros moyens mutualisés entre nations, ne pouvant plus être mis en œuvre au sein d'équipes ou même d'instituts individuels. Le développement de la simulation numérique, nouvel outil de recherche, a également exigé la mise en commun de supercalculateurs.

Mots clef : Soleil, physique solaire, imagerie, spectroscopie, radio, visible, Ultra Violet, histoire

Introduction

La section 1 de cet article présente l'essentiel à savoir sur l'étoile Soleil, permettant de comprendre ensuite le cheminement des connaissances et progrès techniques associés. La section 2 est dédiée aux prémices de l'observation solaire, de 1610 à 1860, puis la section 3 décrit les avancées majeures de la période 1860-1960. Durant ces 100 années, l'observatoire de Paris-Meudon joua un rôle majeur, innovant et mondialement reconnu, avec les premières photographies du Soleil, l'introduction de la spectroscopie, l'invention du coronographe et de l'imagerie monochromatique, la naissance de la radioastronomie et les débuts de l'exploration en ballon. La section 4 résume les avancées de l'ère spatiale en astronomie solaire après 1960, et la section 5 mentionne l'apparition d'une nouvelle activité complémentaire aux observations, la simulation numérique, qui a pu se développer grâce aux évolutions rapides des supercalculateurs à partir de 1970.

1 - Qu'est-ce que le Soleil ?

Le Soleil est une étoile banale dans notre galaxie. Il s'agit d'une sphère de gaz chauds dont le diamètre vaut 110 fois celui de la Terre, et la masse 300 000 fois celle de notre planète. Le Soleil est composé à 90% d'Hydrogène, le reste étant de l'Hélium. La majorité des éléments terrestres, comme les métaux, existent cependant en traces dans le Soleil, mais à l'état gazeux en raison de la température de surface de 6000 degrés. La structure interne du Soleil est opaque, donc inobservable. Le cœur solaire, à haute température et pression, est un « réacteur nucléaire » qui fusionne l'Hydrogène en Hélium, la perte de masse correspondante (4 millions de tonnes/s) produisant la puissance rayonnée par l'étoile dans tout l'espace ($3.86 \cdot 10^{26}$ W). La Terre, hors atmosphère, reçoit $1.75 \cdot 10^{17}$ W soit un flux de 1365 W/m². On estime l'âge du Soleil à 5 milliards d'années, il serait à mi vie. Seule la surface, appelée photosphère, et son atmosphère sont observables au télescope. La photosphère, à 5800 degrés, dévoile des taches (figure 1) qui sont des régions de champ magnétique concentré (0.1 à 0.25 T). La chromosphère, juste au dessus, est partiellement ionisée et plus ténue. Elle n'est visible qu'en spectroscopie, on y voit des filaments sombres et des zones brillantes, les facules (figure 1). Sa température est de 8000 degrés. Le Soleil est entouré par une vaste couronne, gloire peu lumineuse qui n'apparaît que lors

des éclipses totales. Elle se compose de particules chargées (électrons, protons, ions) qui s'échappent en permanence du Soleil en constituant le vent solaire. Il baigne le milieu interplanétaire et correspond à une seconde perte de masse de quelques millions de tonnes/s. La couronne est très chaude (plus d'un million de degrés), donc totalement ionisée, mais très ténue. Les électrons (légers) s'échappent car leur agitation thermique vainc la gravité (vitesse de libération) ; en s'échappant, ils créent un champ électrique qui accélère les protons (1860 fois plus lourds) et ils forment ensemble le vent solaire qui circule à 500 km/s.

Le Soleil est une étoile variable, en ce sens que son flux lumineux varie d'un millième avec une périodicité de 11 ans. Cette variation de luminosité est liée à l'apparition cyclique de taches et facules magnétisées. La surface tachée est faible ou nulle lors des minima, par contre elle peut atteindre plus d'un millième du disque ([figure 1](#)) lors des maxima. Les régions actives (taches et facules) sont souvent instables aux maxima, libérant le surplus d'énergie magnétique qu'elles stockent sous forme d'éruptions et éjections violentes de matière, pouvant se répandre dans le milieu interplanétaire et croiser la Terre. C'est de l'interaction Soleil Terre que proviennent les aurores boréales, qui existent aussi sur les planètes (Jupiter, Saturne, Uranus) possédant une atmosphère et un champ magnétique.

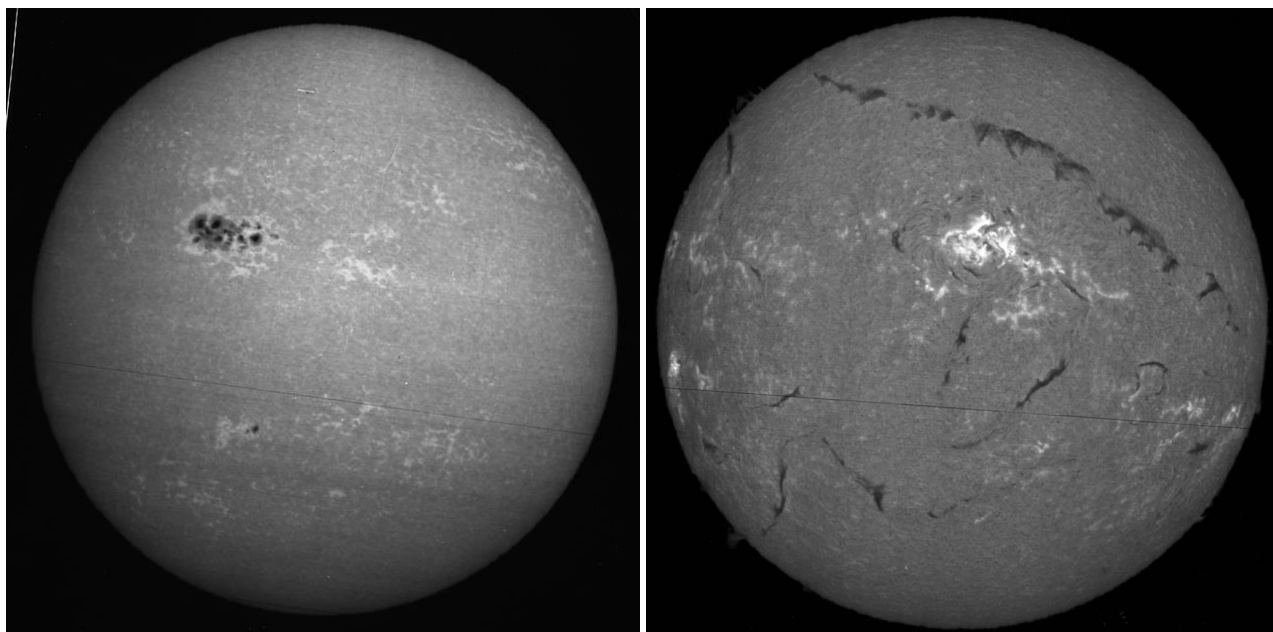


Figure 1 : La surface du Soleil ou photosphère avec ses taches (à gauche), et la chromosphère, couche située juste au dessus de la photosphère, visible seulement en spectroscopie, avec ses filaments sombres et plages faculaires brillantes (à droite). Toutes ces structures sont plus ou moins magnétisées. Crédit OP.

2 – Les débuts de l'observation du Soleil à la lunette

Les plus grosses taches solaires sont à la limite du pouvoir de résolution de l'œil humain. Certaines auraient été vues depuis un millénaire, notamment à l'horizon lors des levers et couchers. C'est l'invention de la lunette de Galilée en 1609 ([figure 2](#)) qui va permettre de les observer avec régularité, le plus souvent par projection du Soleil sur un écran au travers de l'oculaire pour éviter l'éblouissement d'une part, et pour dessiner sur papier le contour des taches au crayon d'autre part. A début du XVII^{ème} siècle, les principaux observateurs étaient, outre Galilée en Italie, Harriot en Angleterre, Scheiner et Fabricius en Allemagne. Scheiner a consigné de nombreux relevés ([figure 2](#)) dans Rosa Ursina (1635). Hevelius a ensuite effectué plus de 4000 observations sur quarante ans à partir de 1640, en Pologne, et on lui doit de nombreux dessins ([figure 3](#)). Très vite, la rotation des taches (liée à la rotation du Soleil sur lui-même en 26 jours) fut repérée par les observateurs.

L'astronomie se structura en France sous l'impulsion de Louis XIV avec la fondation de l'observatoire de Paris en 1667, quelques années après celle de l'observatoire de Greenwich en Angleterre, et celle de l'Académie des Sciences. Le premier directeur fut Jean Dominique Cassini, à qui l'on doit les premiers relevés

de taches vers 1675 (figure 3). Puis l'observation solaire se développa à Paris avec les mesures du diamètre angulaire du Soleil (il fluctue avec les saisons) par l'abbé Jean Picard et son élève Philippe de la Hire. Elle tombera ensuite en désuétude, au profit de la mécanique céleste, jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle où elle reprendra puis sera transférée à Meudon par Henri Deslandres (voir plus loin).

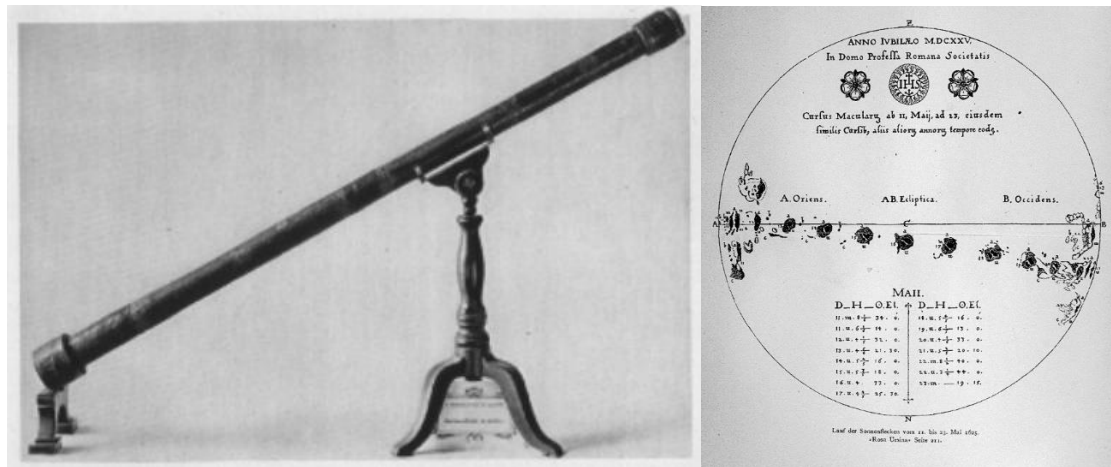


Figure 2 : lunette de Galilée et premiers relevés des taches de Christoph Scheiner en 1625 (Rosa Ursina)

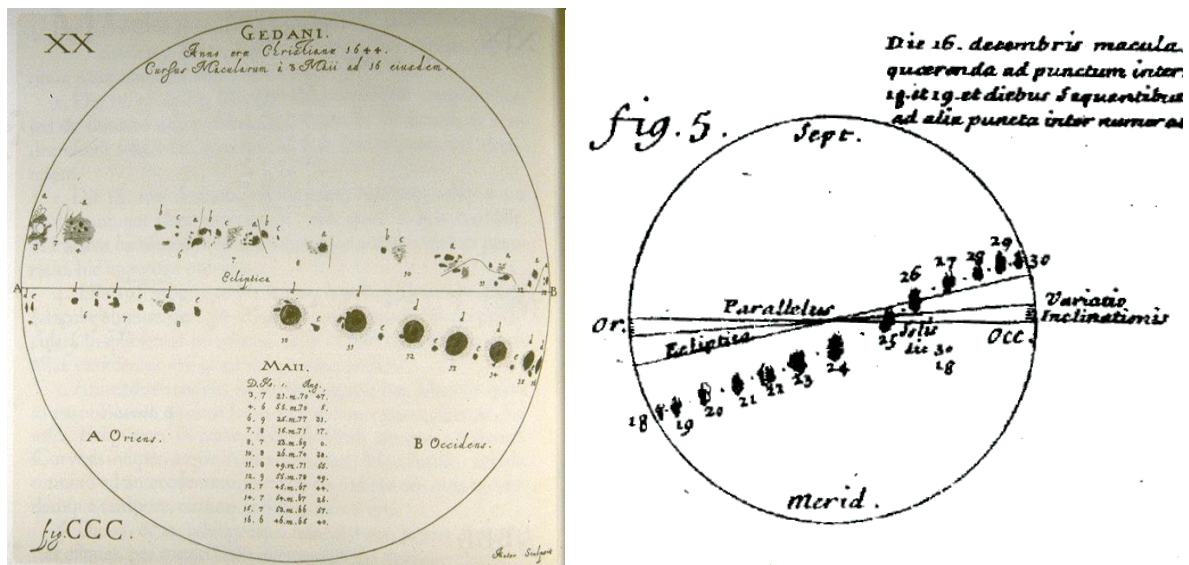


Figure 3 : Dessins de la rotation des taches d'Hevelius (à gauche) et de Cassini vers 1676 (à droite)

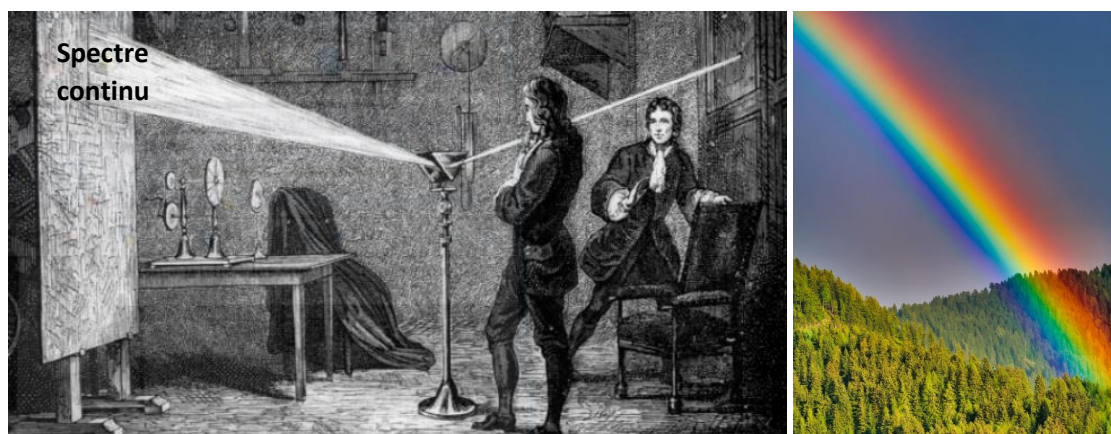


Figure 4 : Newton décompose la lumière solaire avec un prisme (1666) et découvre le spectre continu du Soleil ; la dispersion de la lumière (arc en ciel) par les gouttes de pluie produit le même effet, parce que l'indice de réfraction de l'eau et du verre dépend de la couleur (ou longueur d'onde).

Newton décomposa la lumière solaire en 1666 à l'aide d'un prisme et constata que la lumière blanche est la superposition d'une infinité de radiations dites monochromatiques caractérisées par leur longueur d'onde (figure 4) ; c'est ce que font les gouttes d'eau en formant l'arc en ciel, parce que l'indice de réfraction du verre et de l'eau dépend des couleurs (les rayons bleus sont plus déviés que les rouges, on appelle cela phénomène de dispersion). C'est le « spectre continu » du Soleil, assez proche de celui d'un « corps noir » à la température de 5800 degrés, dont le maximum d'émissivité est situé dans le jaune-vert. La superposition des radiations colorées donne la lumière « blanche ». Il faudra attendre 1817 (figure 5) pour distinguer des raies noires dans le spectre continu : c'est le spectre de « raies » mis en évidence par Fraunhofer où l'on distingue quelques raies larges (les raies de l'Hydrogène, du Calcium, du Magnésium, du Sodium) et des milliers de raies très fines, qui ne seront résolues et identifiées que bien plus tard. Les « raies » du spectre sont la signature des éléments chimiques présents dans l'atmosphère solaire. Elles sont sombres parce qu'elles absorbent la lumière issue de la surface. Au contraire, les structures situées au dessus du limbe (comme les protubérances) donnent des raies brillantes parce qu'elles émettent sur le fond de ciel noir.

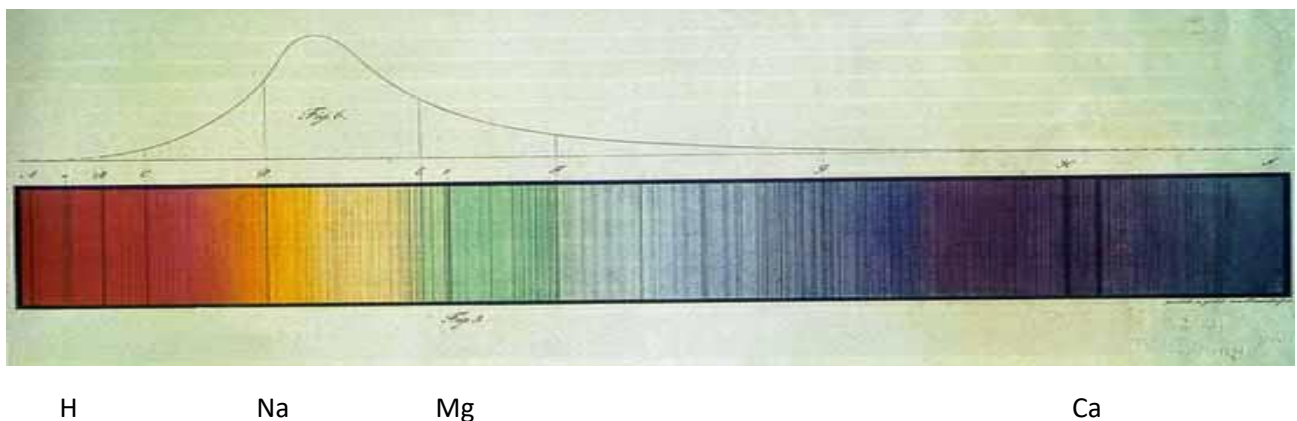


Figure 5 : Spectre de raies de Fraunhofer (1817) avec les raies fortes des éléments H, Na, Mg, Ca, etc...

3 – Période 1860-1960 : l'essor fulgurant de la physique solaire avec Meudon au premier plan

L'observation du Soleil, de Galilée jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle, a essentiellement consisté à étudier les mouvements des taches. Leur relevé est devenu très régulier à partir de 1750, ce qui a permis à l'allemand Heinrich Schwabe de découvrir l'existence du cycle solaire de 11 ans vers 1850, en compilant les données accumulées. Cependant, les relevés du XVII^{ème} siècle, plus sporadiques, ont montré l'existence d'un minimum anormalement prolongé, dit minimum de Maunder (du nom de son découvreur) entre 1650 et 1700 ; d'autres minima profonds, mais moins étendus dans le temps ont été remarqués par Gleissberg avec une périodicité très approximative autour de 100 ans. Le cycle d'activité de 11 ans est donc modulé, il y a des successions de cycles forts et faibles. Le cycle magnétique dure 22 ans (renversement de la polarité des pôles tous les 11 ans lors des maxima), il a été découvert par George Hale aux USA, au début du XX^{ème} siècle, une dizaine d'années après qu'il ait compris la nature magnétique des taches (1908).

Jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle, le dessin était de rigueur en observation solaire. La première photographie en lumière blanche remonte à 1845, elle est attribuée à Léon Foucault et Hippolyte Fizeau à Paris avec le procédé du daguerréotype (figure 6). L'apparition de la photographie constitua une première révolution dans l'histoire de la physique solaire, parce qu'elle permettait désormais une conservation objective des observations, contrairement aux dessins dans lesquels figure une interprétation personnelle et inévitable de l'observateur (par exemple les pastels de Trouvelot, astronome meudonnais, figure 7). Dans la foulée, l'anglais Warren de la Rue effectua la première photographie d'une éclipse solaire (1860) en Espagne (figure 8), à l'aide de son photohéliographe, un instrument spécialement conçu pour l'imagerie du Soleil en lumière blanche sur plaque photographique (y compris du disque en dehors des éclipses).

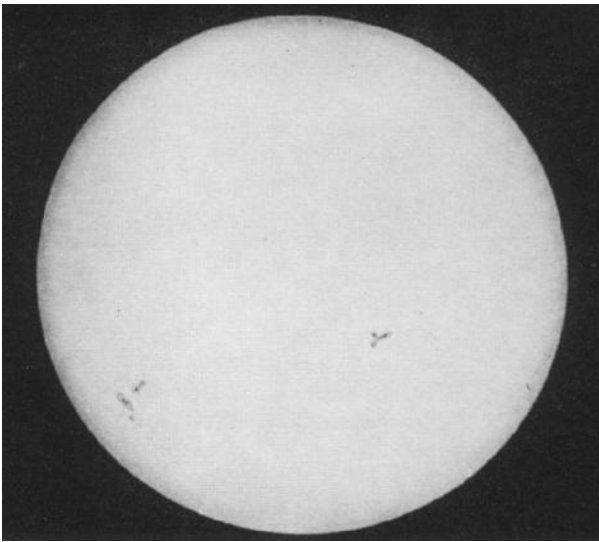


Figure 6 : Première photographie du Soleil (lumière blanche) par Foucault et Fizeau (1845), à l'observatoire de Paris (procédé du daguerréotype).

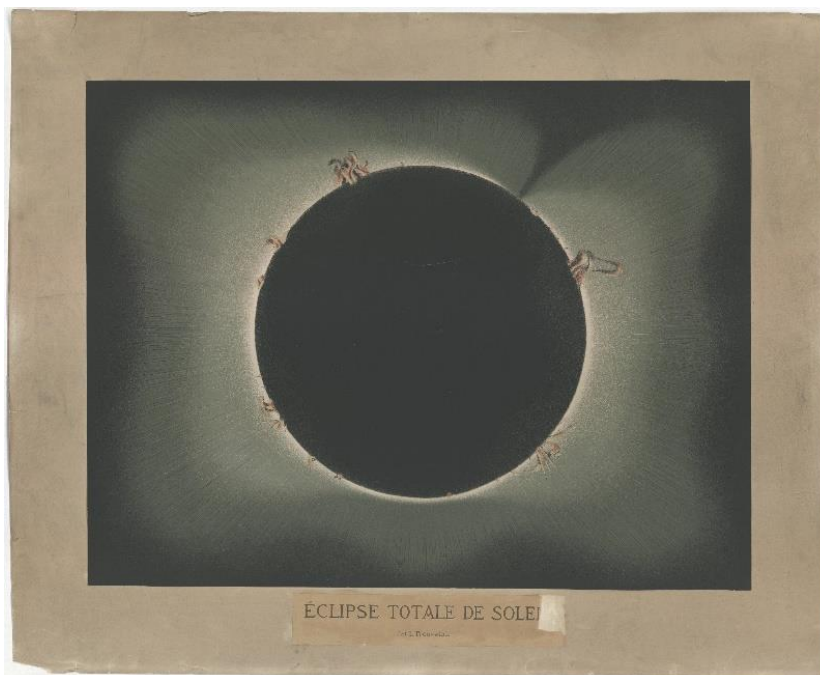


Figure 7 : un pastel d'éclipse solaire par Etienne Trouvelot (Meudon) vers 1860, montrant la couronne blanche et chaude (1 million de degrés), diffusant (par les électrons) la lumière du disque masqué par la Lune ; et les protubérances autour du limbe, structures d'Hydrogène plus froides (8000 degrés) et plus denses, de couleur rouge, émettant dans la raie H α . Couronne et protubérances sont invisibles hors éclipse. Crédit OP.

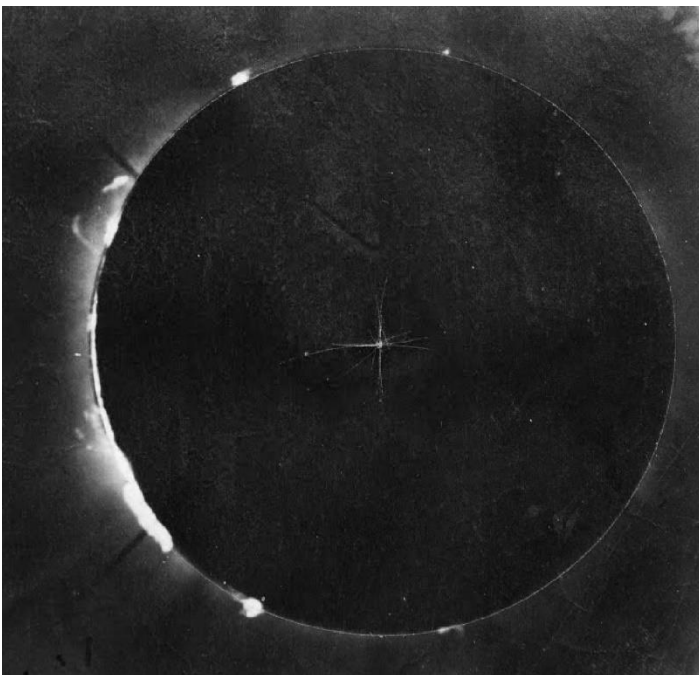


Figure 8 : première photographie d'une éclipse de Soleil (1860) par le britannique Warren de la Rue, en Espagne, avec son photohéliographe, spécialement conçu pour la photographie du Soleil. On voit les protubérances autour du limbe, structures d'Hydrogène dont la couleur naturelle est rouge, car elles émettent dans la raie H α . Elles restent invisibles hors éclipse.

On doit à Jules Janssen (figure 9) l'introduction de l'astronomie physique en France, nouvelle science appelée aujourd'hui astrophysique, et dont le but est l'étude physico chimique des astres (constitution et nature physique). En effet, l'observatoire de Paris se consacrait essentiellement à la mécanique céleste (description et étude du mouvement des astres). Janssen, inspiré par les travaux des premiers spectroscopistes comme Kirschhoff ou Bunsen, appliqua la technique à l'astronomie, dans le but d'isoler la lumière des raies du spectre solaire, et donc d'étudier le milieu qui les forme, c'est-à-dire les couches atmosphériques qui sont inaccessibles à l'observation en lumière blanche. Janssen créa ainsi une seconde révolution lors de l'éclipse du 18 Août 1868 en Inde, à Guntoor, lorsqu'il démontra, avec Norman Lockyer, la possibilité d'observer les protubérances en tout temps, donc hors éclipse, grâce à la spectroscopie.



Figure 9 : Jules Janssen (1824-1907), photographié par Nadar, crédit Gallica/BNF. Janssen fonda l'observatoire de Meudon en 1875. Un vrai « baroudeur » ou « globe-trotter » de la physique céleste, comme l'explique Françoise Launay dans son livre paru en 2008 chez Vuibert.

Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

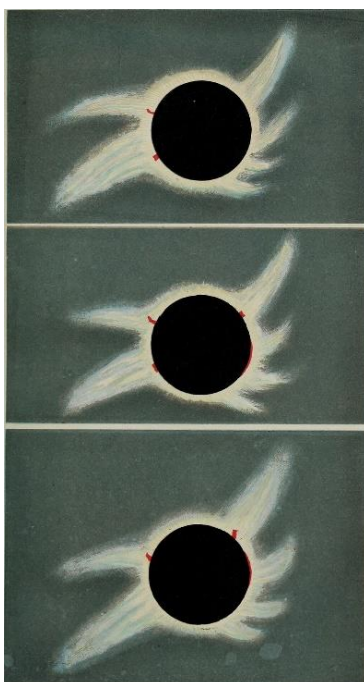
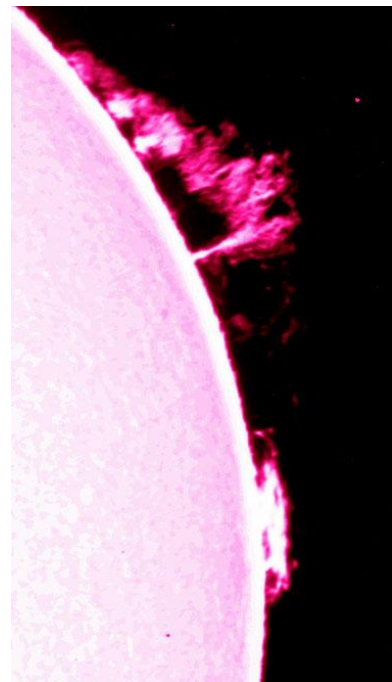


Figure 10

A gauche, dessins de l'éclipse de 1868, montrant la couronne blanche et les protubérances rouges du bord solaire. Couronne et protubérances ne sont visibles à l'œil que lors des éclipses.

A droite, une protubérance vue dans la lumière de la raie rouge $H\alpha$ de l'Hydrogène, hors éclipse, grâce à la spectroscopie à balayage de fente.

Crédits OP.



Ainsi, le jour de l'éclipse, Janssen ([figure 10](#)) repéra visuellement, au bord du Soleil, une protubérance. Ces structures d'Hydrogène apparaissent naturellement à l'œil en rouge, lors d'une éclipse totale, car elles sont constituées d'Hydrogène. La couronne, 1000 fois moins dense, se dévoile également par diffusion de la lumière blanche du disque (diffusion Thomson par les électrons). Mais en dehors des éclipses, on ne voit plus ces structures, car leur luminosité est beaucoup trop faible par rapport à celle du disque (un million de fois moins pour la couronne proche). Le lendemain de l'éclipse, Janssen pointa son spectroscopie en direction de la protubérance repérée lors de l'éclipse, et celle-ci apparut dans la raie rouge du spectre, dite $H\alpha$ de l'Hydrogène. Grande découverte ! Janssen a trouvé une méthode permettant d'observer, grâce à la spectroscopie, les structures de l'atmosphère solaire qui se dérobent à la vision en dehors des éclipses. Cette avancée a un retentissement mondial, car elle est à l'origine de toutes les techniques d'étude des raies spectrales et d'imagerie monochromatique permettant le sondage des atmosphères en altitude. La spectroscopie va donc permettre de faire davantage de physique. Janssen sera reçu à l'Académie des sciences en 1873.

Au cours de cette même éclipse, une raie jaune inconnue ([figure 11](#)) apparaît dans le spectre du limbe solaire. Janssen le constate mais n'y prête guère attention, c'est Lockyer qui trouvera là un nouvel élément baptisé Hélium, encore inconnu sur Terre ; c'est la seconde découverte majeure de la spectroscopie !

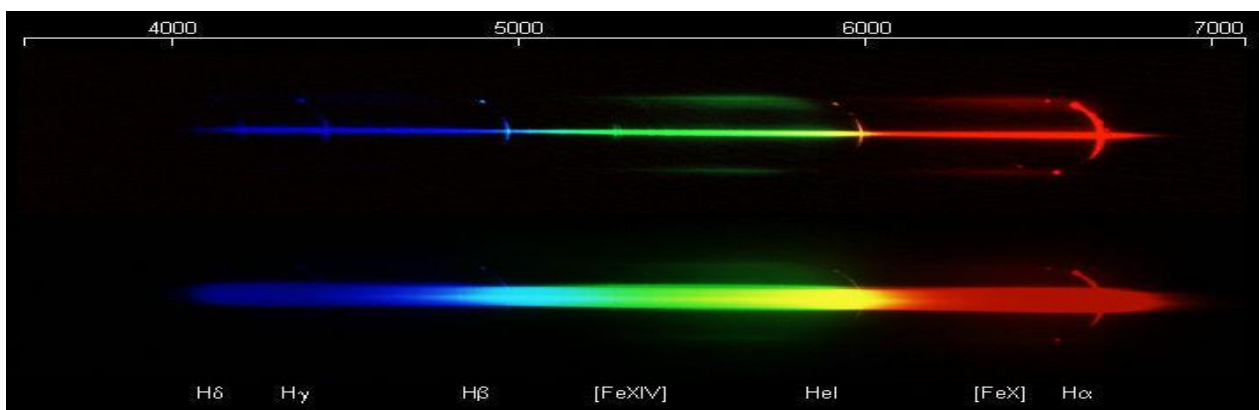


Figure 11 : spectre du bord solaire, où apparaissent lors des éclipses la raie verte coronale du Fer 13 fois ionisé, la raie jaune de l'Hélium neutre et plusieurs raies de l'Hydrogène (bleu pour $H\beta$, rouge pour $H\alpha$).
Crédit AstroSurf.

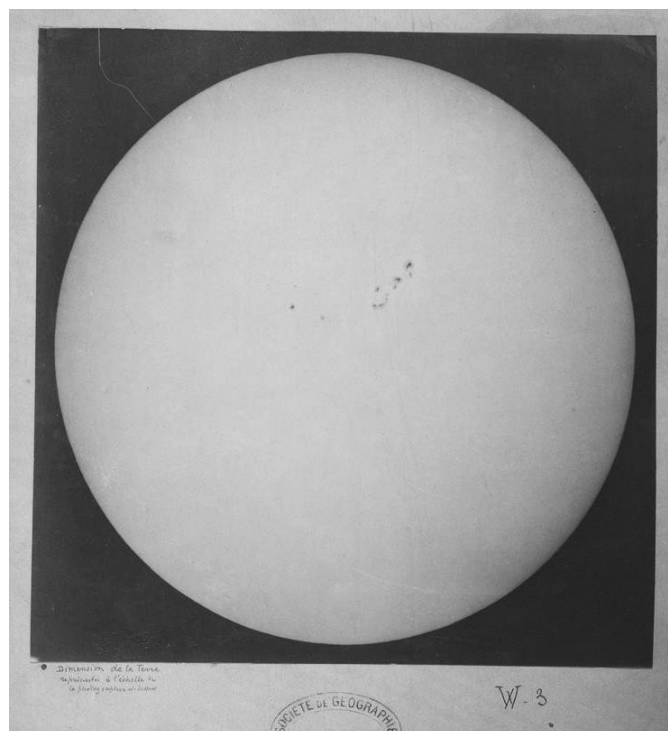


Figure 12 : image prise par Janssen le 20 Juillet 1874, bien avant l'installation à Meudon. Crédit Gallica/BNF.

Janssen mit ensuite au point une lunette d'observation du Soleil en lumière blanche (figures 12 et 13) et conçut un appareil spécial (figure 13, à gauche) pour l'observation du passage de Vénus devant le Soleil, en Décembre 1874, visible du Japon, permettant d'améliorer le calcul de la distance Soleil Terre. Il s'agit du premier appareil de chronophotographie, qu'on peut considérer comme l'un des ancêtres du cinématographe qui viendra plus tard. Ce dispositif, baptisé révolver photographique, comportait une surface sensible sous la forme d'une couronne circulaire rotative comportant 48 secteurs, donc pouvant prendre 48 vues successives d'un phénomène rapide comme les points de contact entre Vénus et le limbe solaire.

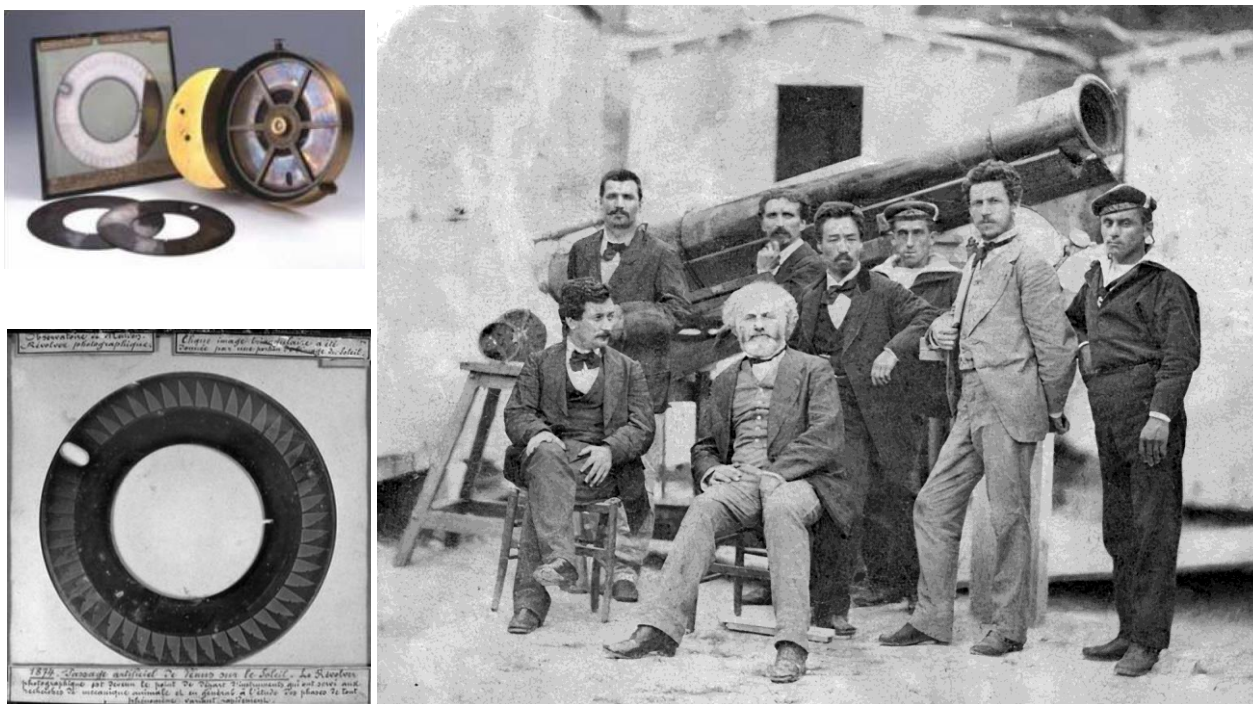


Figure 13 : Janssen, le révolver photographique (crédit OP) et la lunette solaire d'observation du passage de Vénus, fin 1874. A noter que le support en bois sera récupéré pour porter une lunette de bien meilleure qualité optique à partir de 1875 à Meudon.

Fort de ces beaux succès, en spectroscopie et en imagerie, Janssen considérait que le besoin d'un nouvel observatoire tout entier dédié à l'astronomie physique devenait impérieux, et c'est ainsi qu'il obtint de l'Etat l'affectation de l'ancien domaine royal de Meudon à l'astronomie, en 1875 (il avait aussi pensé à une autre possibilité, la Malmaison). A cet endroit qui domine Paris, à la campagne (la ville l'a dévorée depuis !), occupé par l'armée, Janssen y trouva le château neuf dévasté en 1870 par un incendie (figure 14). Il entreprit sa transformation en observatoire, projet qui dura 20 ans. Les ailes furent rasées et la partie centrale fut conservée et surmontée d'une grande coupole de 18 mètres de diamètre (figure 15). Elle abrite depuis 1893 la plus grande lunette d'Europe, composée en fait de deux lunettes superposées de 67 et 83 cm (figure 16).

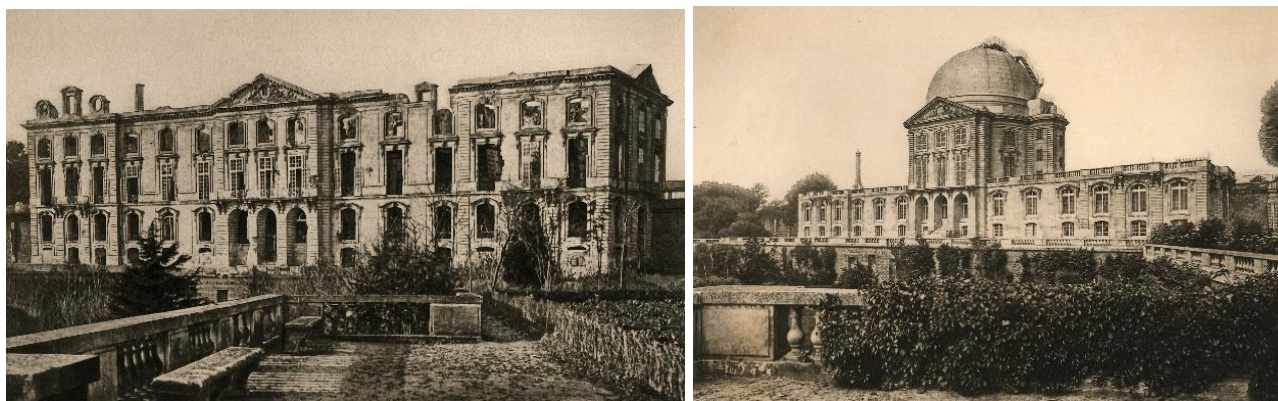
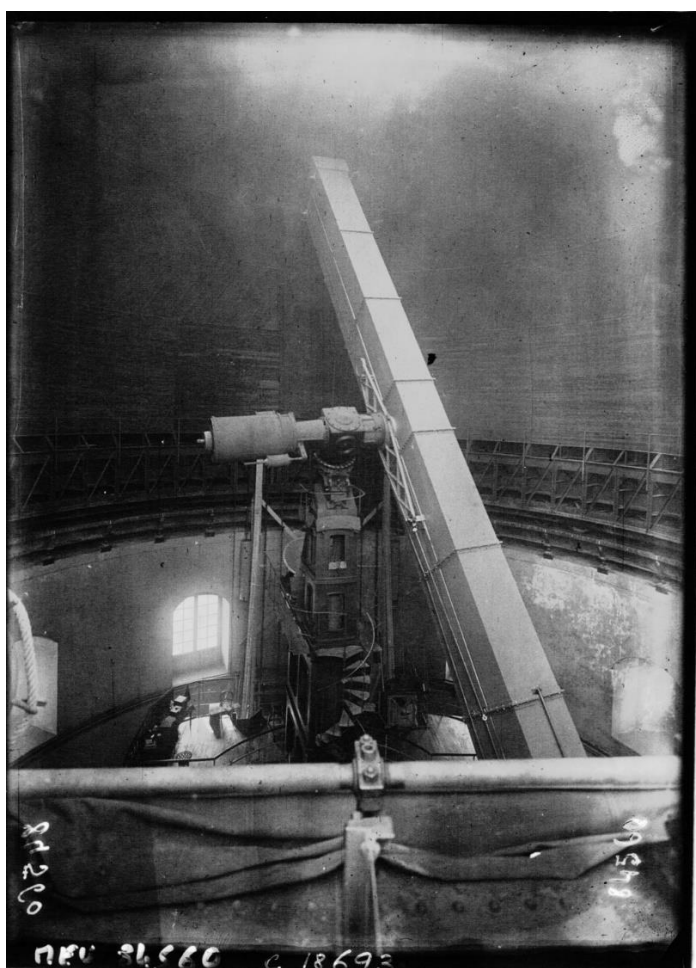


Figure 14 : le Château neuf dévasté (à gauche), puis transformé en observatoire (à droite). Crédit OP.



Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Figure 15 : Grande coupole de Meudon en 1920 bâtie sur les ruines du Château neuf. Crédit Gallica/BNF.



Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Figure 16 : Grande lunette de Meudon en 1920. L'instrument est une lunette double, comportant un objectif visuel de 83 cm de diamètre et une lunette photographique de 67 cm de diamètre. L'optique visuelle est optimisée pour la sensibilité de l'œil, tandis que l'optique photographique l'est pour le domaine de sensibilité des plaques de l'époque (bleu). La longueur focale de l'instrument est 16 m. Un plancher mobile a été installé par la suite. Les deux plus grandes lunettes sont américaines, avec un diamètre un peu supérieur. On n'en construit plus depuis longtemps, les télescopes à miroirs ayant beaucoup plus d'avantages. Agence Meurisse, crédit Gallica/BNF.

Pendant les travaux de restauration du Château neuf et de la grande coupole, Janssen est occupé par la mise en place d'une lunette spécialement dédiée à la photographie de la surface solaire en lumière blanche (figure 17), d'optique optimisée par Adam Prazmowski. L'image primaire est agrandie par un oculaire de projection sur des grandes plaques photographiques de 30 x 30 cm² en verre. Janssen développe un laboratoire photographique associé, avec un procédé au collodion humide, et invente un obturateur à rideau pour minimiser les temps de pose (1/3000 s), et figer au mieux la turbulence atmosphérique (réalisé par la maison Gautier).



Figure 17 : lunette solaire de Janssen dans le parc de Meudon à la fin du XIX^{ème} siècle. Elle était installée à ses débuts sur une monture roulante en bois. L'objectif avait 14 cm de diamètre pour 2 m de focale, mais un oculaire agrandissait considérablement les images pour utiliser des plaques de 30 x 30 cm² au foyer. Crédit OP.

En pratique, les plaques photo étaient surtout sensibles dans le bleu, donc malgré l'observation en lumière blanche, le résultat donnait des images issues de la partie bleue du spectre, autour de la bande G du spectre de Fraunhofer (figures 18 et 19), vers 430 nm de longueur d'onde. Pour cette raison, Prazmowski avait optimisé l'objectif de la lunette solaire de Janssen pour le bleu.

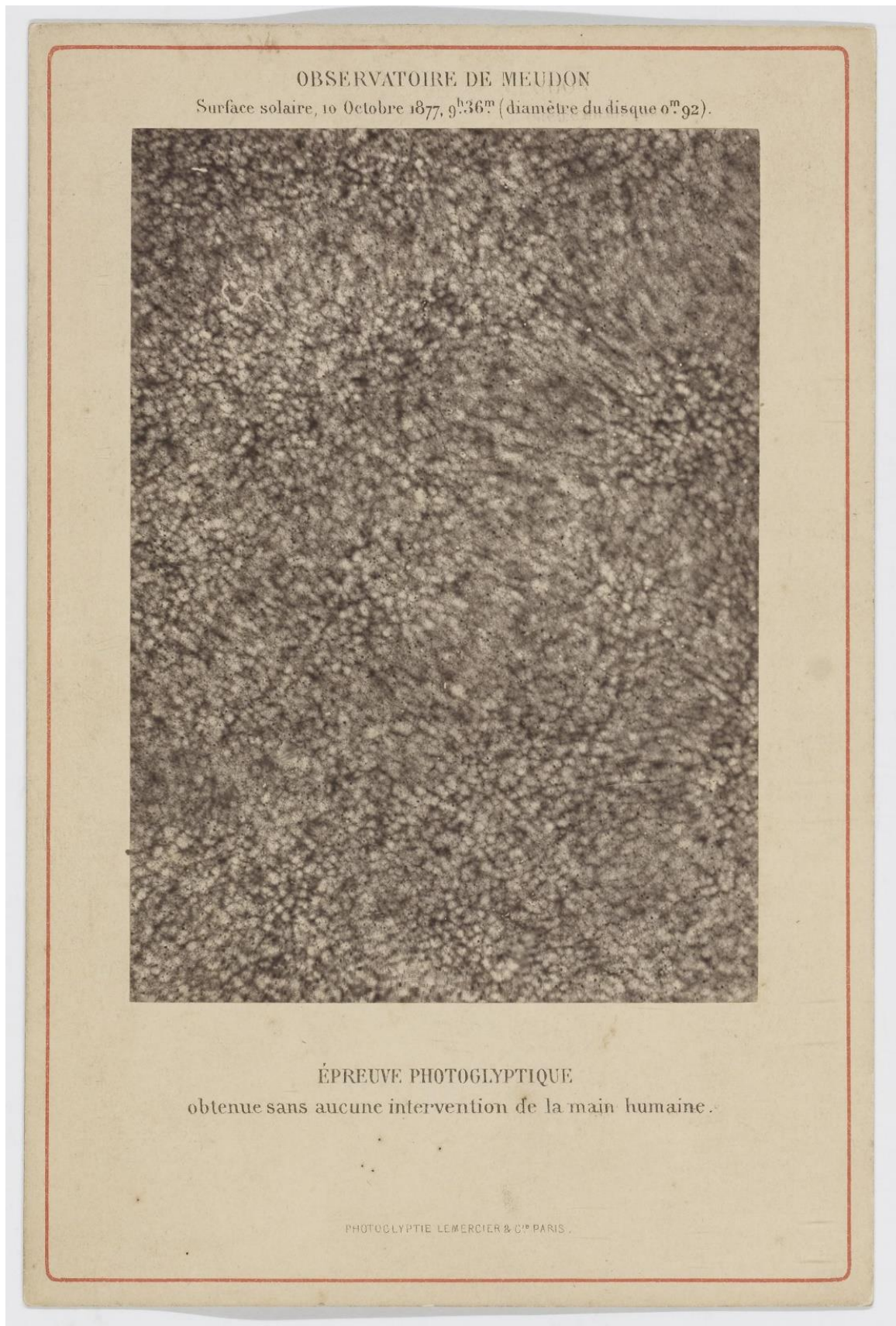


Figure 18 : Un bel exemple de photographie de la granulation solaire, Octobre 1877. Crédit OP.

Janssen réalisa avec ses assistants 6000 clichés dont malheureusement seulement 1 % sont parvenus jusqu'à nous, le reste ayant été perdu ou malencontreusement détruit. Il s'agit des premières photographies détaillées, donc à haute résolution, de la surface solaire, en particulier de la granulation, signature de la convection sous jacente, qui est difficile à observer dans les sites de plaine en raison de la faible dimension de ses structures (1 seconde de degré environ). Janssen publia un échantillon de 50 plaques dans son atlas de photographies solaires conservé à la bibliothèque de l'observatoire, et en ligne sur Gallica.

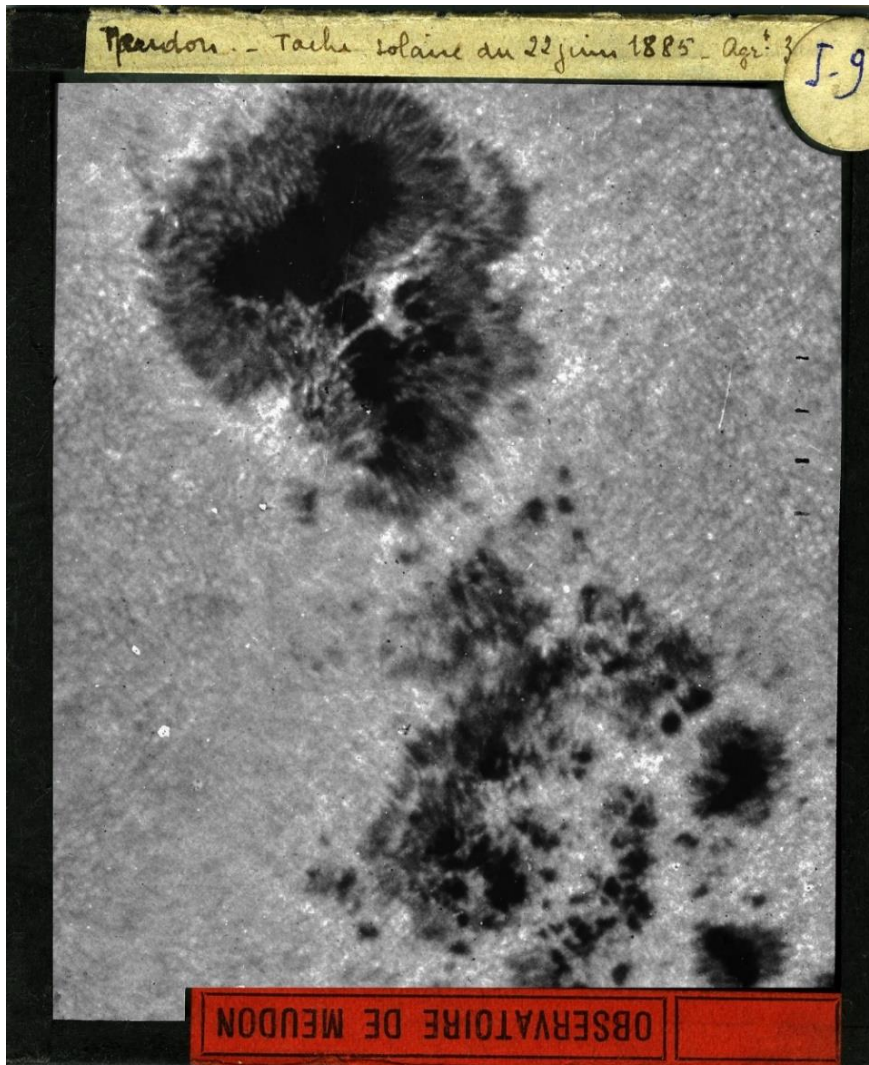


Figure 19 : cliché d'un groupe de taches solaires, photographié en 1885 avec la lunette solaire de Janssen dans le parc de Meudon. Autour de la tache, on distingue la granulation, présente partout sur la surface solaire (il y a 5 millions de granules en perpétuel renouvellement sur le Soleil).

Ci-dessous boîte à plaques.

Crédit OP.



Après ce travail de pionnier en imagerie à haute résolution, Janssen s'intéressa à la présence (ou non) d'oxygène dans le spectre solaire. On sait que l'atmosphère de la Terre, qui contient de la vapeur d'eau, de l'oxygène et de l'azote, contamine le spectre solaire par les raies de ces molécules, que l'on trouve souvent dans le rouge. La question était de savoir si les raies de l'oxygène pouvaient également être d'origine solaire. La première idée que l'on peut avoir pour trancher une telle question consiste à s'élever, pour diminuer l'épaisseur d'atmosphère terrestre au dessus de l'observateur, et ainsi provoquer l'effacement progressif des raies telluriques au fur et à mesure que l'on monte (celles d'origine solaire ne variant pas). Janssen entreprit donc de transporter son spectroscopie en montagne, notamment au Pic du Midi (2870 m). Cependant, son dévolu tomba sur les 4810 m du Mont Blanc, sur les pentes duquel Joseph Vallot faisait déjà de la géophysique avec son observatoire situé à 4350 m sur les rochers des Bosses. C'est ainsi qu'une première incursion dans le massif (1888) amena Janssen au refuge des Grands Mulets à 3050 m. En 1890, il réalisa sa première ascension, dans des conditions épiques. Ses difficultés de locomotion et les péripéties de l'ascension au travers de glaciers complexes et crevassés ne le firent pas reculer : il envisagea de voyager assis dans une chaise échelle ou en traineau avec l'assistance de 12 guides et de porteurs (figure 20). Faisant étape à l'observatoire Vallot, Janssen parvint au sommet, fut frappé par son horizon, et décida de la construction d'un observatoire, qui aurait pu être pérenne s'il avait pu bénéficier de fondations, ce qui ne fut pas le cas.

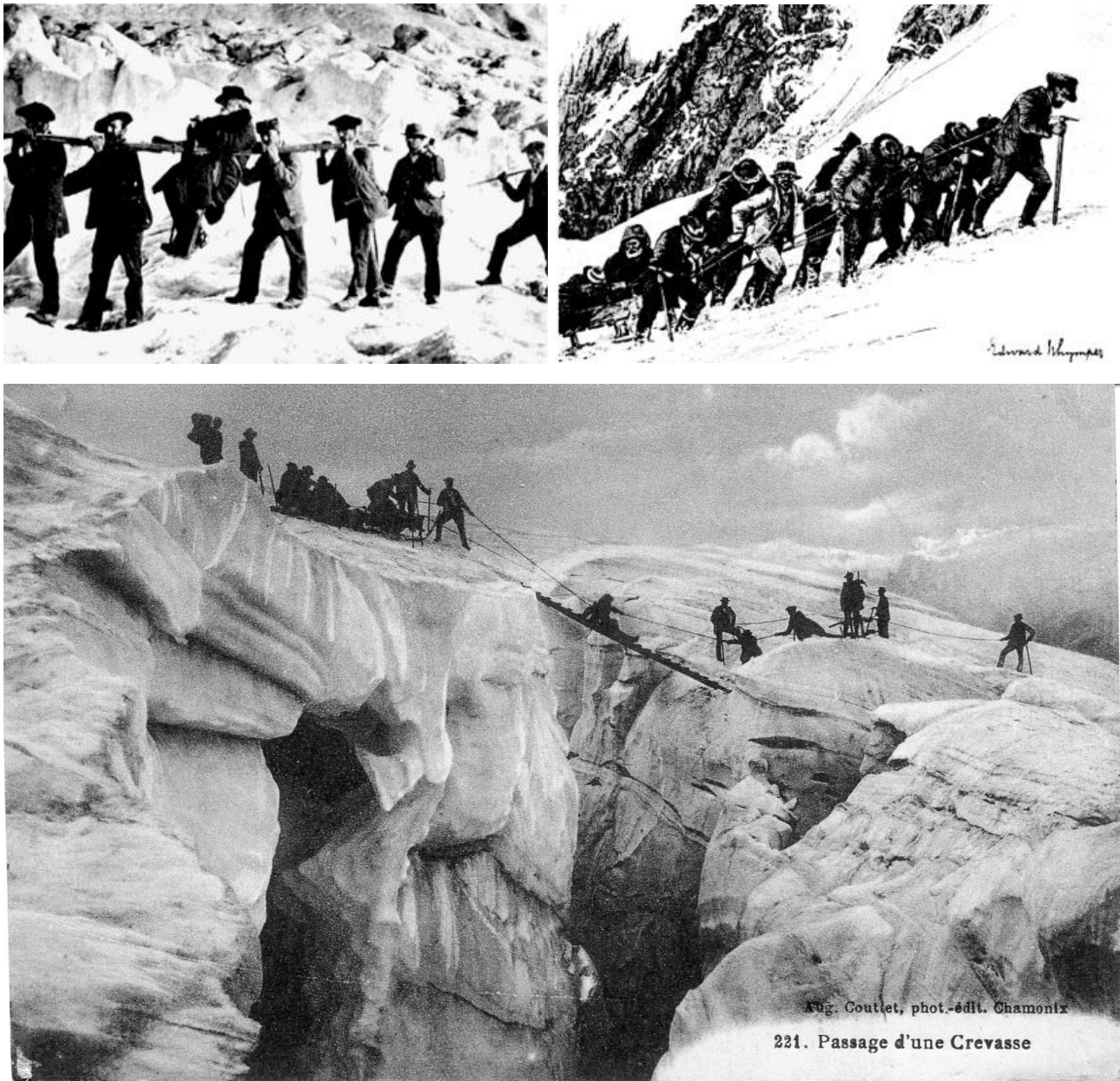


Figure 20 : ascensions épiques de Janssen au Mont Blanc, en chaise échelle ou en traineau. Crédit OP.

Face à l'impossibilité d'une assise solide, Janssen décida la pose de son observatoire directement dans la glace du sommet. L'édifice (figure 21) fut conçu et construit à Meudon avant son transport en pièces détachées adaptées aux charges possibles pour un porteur ou un traineau. Il y avait deux niveaux, le niveau bas devant être enfoui dans la neige (figure 22). Des vérins permettaient d'ajuster l'assise du bâtiment. La tourelle servait aux observations météo (un météorographe enregistreur à longue marche de Jules Richard y fut placé à demeure). La grande lunette (objectif des frères Henry) de 30 cm de diamètre et 5 m de focale n'était pas sur monture astronomique ; elle était alimentée en lumière par un sidérostade polaire (miroir plan de 60 cm) installé devant son objectif, l'axe de la lunette restant fixe et parallèle à l'axe de rotation de la Terre. Celle-ci dépassait d'un des murs ; on observait depuis le niveau inférieur. Janssen vint l'inaugurer en 1893 et y remonta en 1895. En réalité, il n'utilisait pas lui-même la grande lunette pour ses observations du spectre solaire, mais un spectroscopie Duboscq qu'il emportait toujours avec lui. Il constata une diminution de l'intensité des raies de l'oxygène avec l'altitude. On sait aujourd'hui qu'il y a bien de l'oxygène dans l'atmosphère solaire, mais pas sous la forme de gaz diatomique O_2 . Les observations spatiales en Ultra Violet ont montré à partir de 1960 qu'il y a des atomes ionisés de l'oxygène et de l'azote dans la couronne solaire, ainsi que des ions de bien d'autres éléments connus sur Terre comme les métaux. La grande lunette fut pourvue d'un spectrographe de 1 m en 1904. Le cofondateur de la république tchèque, Milan Stefanik, s'y rendit plusieurs fois.

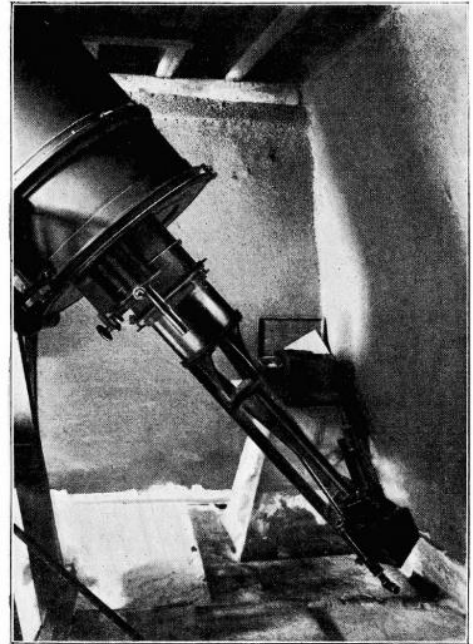


Fig. 1. — Partie oculaire de la lunette, portant le spectroscopie à monture d'aluminium.

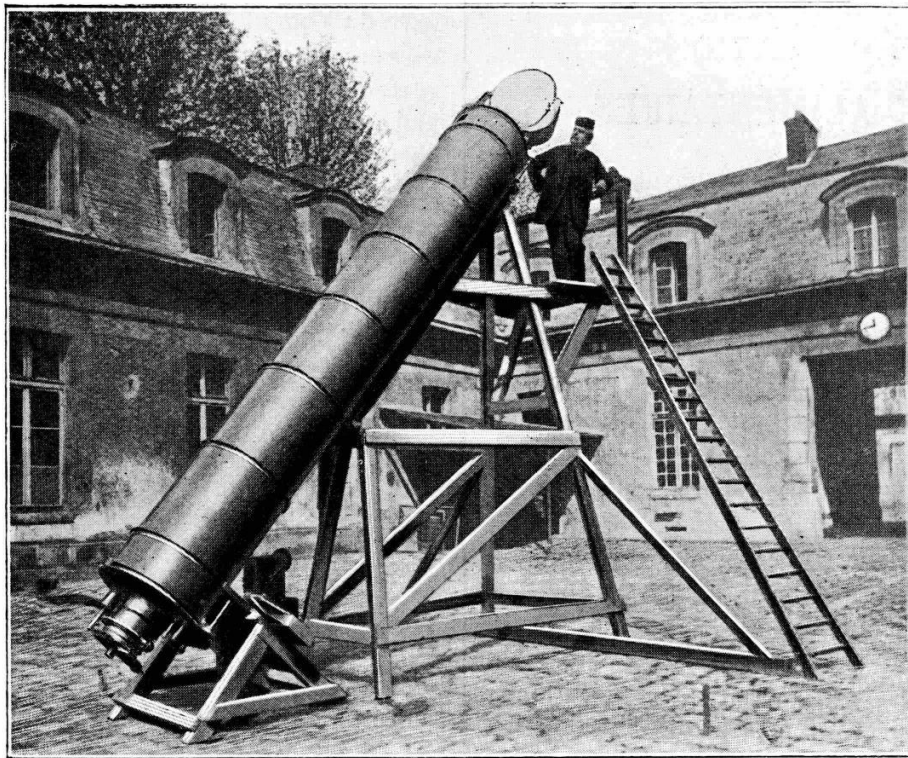


Fig. 5. — La lunette montée, dans la cour de l'Observatoire de Meudon, avant son transport au Mont-Blanc.

Figure 21 :
l'observatoire du mont Blanc construit et testé à Meudon avant son transport à dos d'homme ou en traineau pour le sommet, avec sa grande lunette polaire de 30 cm de diamètre, 5 m de longueur focale (1893), et son petit spectrographe de 1 m accroché au foyer (1904). Crédit OP.

L'observatoire du Mont Blanc fonctionna jusqu'en 1909 (deux ans après la mort de Janssen), avec de nombreuses expéditions, souvent astronomiques, mais parfois pluridisciplinaires. Subissant la pression et le mouvement des glaces, il finit sa vie disloqué, ce qui provoqua son abandon. Un petit film (extrait d'un 9.5 mm Pathé) relate une ascension vers 1900 à l'époque de l'observatoire (figure 23).



Figure 22 : l'observatoire du mont Blanc. Crédit ETH/Zürich.



Figure 23 : arrivée au sommet du mont Blanc, extrait MP4 d'un film Pathé 9.5 mm. Téléchargement :

<https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/HY/Media1.mp4>

Pendant que Janssen s'affairait au Mont Blanc, un certain Henri Deslandres (futur académicien, [figure 24](#)) fut engagé en 1888 à l'observatoire de Paris par l'amiral Ernest Mouchez, son directeur, pour y fonder un laboratoire de spectroscopie. C'est tout naturellement qu'il se tourna vers la spectroscopie solaire où tout était à développer. Il se souvint que Janssen, après l'éclipse de 1868, avait énoncé le principe du spectrohélioscope, ou spectrographe imageur monochromatique par balayage de fente : « en faisant tourner le spectrographe sur son axe, la fente d'entrée balaie la surface solaire, et en plaçant dans le spectre une seconde fente isolant une raie spectrale bien choisie, une image monochromatique se forme sur la rétine à travers un oculaire ». Il faut pour cela bénéficier de la persistance rétinienne, donc tourner le spectroscopie suffisamment vite (celui de Janssen avait une manivelle). Si l'on remplace l'œil par une plaque photosensible, on a réalisé un spectrohéliographe enregistreur. Telle était l'idée de Janssen, énoncée en 1869, reprise et améliorée par Deslandres à Paris, mais également par George Hale aux USA, de manière indépendante. C'est ainsi que naquit le spectrohéliographe, donnant à Paris ses premières images monochromatiques du Soleil dès 1893 (qu'on appelle spectrohéliogrammes), et les premiers enregistrements des protubérances dès 1894 ([figure 25](#)).



Figure 24 : Henri Deslandres (1853-1948). Crédit OP. Inventeur du spectrohéliographe en 1893 à Paris, il déménagea à Meudon en 1898 où il mit en chantier un grand spectrohéliographe quadruple qu'il réalisa avec son élève Lucien d'Azambuja. Ce dernier fut chargé d'organiser un service d'observations quotidiennes du Soleil dès 1908, qu'il développa et qui perdure aujourd'hui. Deslandres revint à Paris en 1926 pour être nommé directeur de la fusion des deux établissements de Paris et de Meudon. Une anecdote : « lorsque Deslandres fut nommé à Meudon, il vint prendre contact et entra par la porte du concierge. Lui barrant le couloir, il vit la petite silhouette du père Bardirot qui lui dit : c'est vous le nouvel astronome ? Ne venez pas, Monsieur, ils sont tous fous ici... »

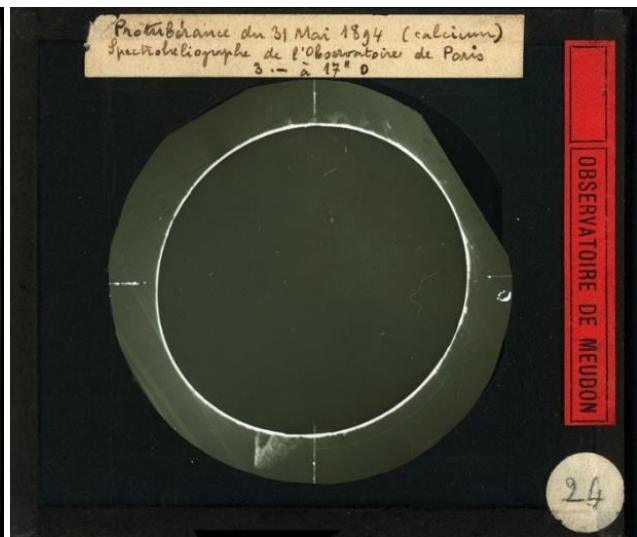
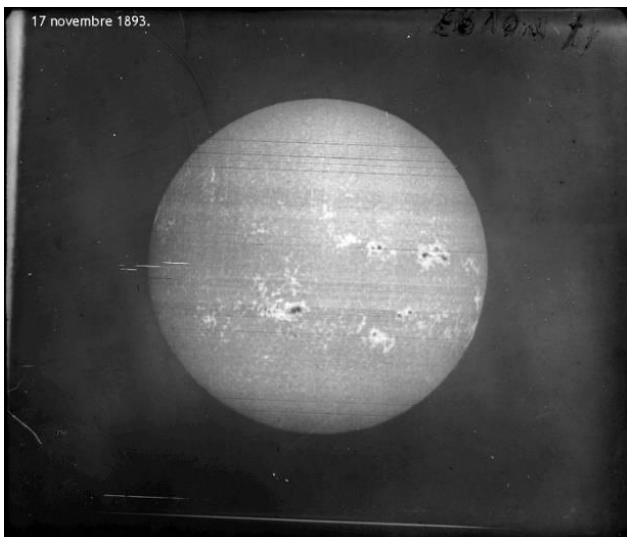


Figure 25 : Premiers spectrohéliogrammes ou images monochromatiques faites à Paris en 1893 et 1894 par Henri Deslandres. La raie choisie est la raie violette « K » du calcium. L'image de gauche montre les régions actives entourées de plages brillantes, celle de droite (avec un simple masque sur le disque solaire pour éviter la surexposition) révèle les protubérances au limbe. Crédit OP.

Pensant trouver plus de moyens à Meudon, Deslandres y déménagea en 1898 avec ses instruments. Il embaucha un assistant, Lucien d'Azambuja ([figure 26](#)), âgé de seulement 15 ans et mit en chantier avec lui la réalisation d'un grand spectrohéliographe quadruple ([figure 27](#)), qui fut achevé en 1908, et qui était destiné à la fois aux observations quotidiennes et aux recherches scientifiques de pointe.



Lucien d'Azambuja

Figure 26 : Lucien d'Azambuja (1884-1970), « embauché par Deslandres à 15 ans, était un homme pas très grand, toujours tiré à quatre épingles, costume trois pièces, chemise à col dur, regard pétillant derrière ses lorgnons. Excellent instrumentaliste, il était intraitable sur le service... ». Embauché à 15 ans, d'Azambuja resta 60 ans à Meudon, jusqu'à la retraite de son épouse en 1959. Il avait alors 75 ans. Carrière incroyable aujourd'hui ! Crédit OP.

10 - SPECTROHELIOGRAPHE QUADRUPLE DE 15^m

Photo : Pasteur

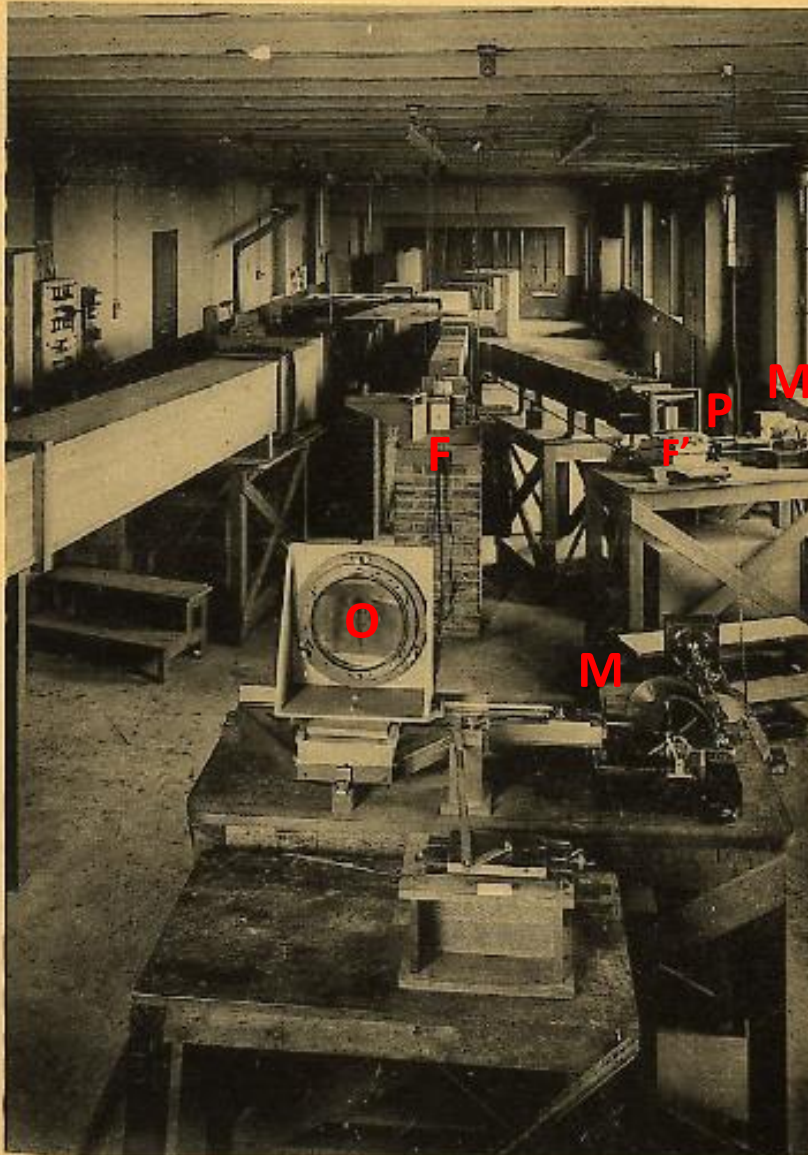


Figure 27 : le grand spectrohéliographe quadruple de 1908. Il s'agit d'un instrument versatile possédant deux chambres de 3 m pour les observations quotidiennes en Hydrogène et Calcium ; pour les observations de recherche, une chambre de 3 m polyvalente multi-raie et une chambre à haute résolution spectrale de 7 m, également multi-raie. Il y avait deux éléments dispersifs, un train de 3 prismes et un réseau plan de Rowland. Sur la figure, on voit en avant l'objectif imageur O du Soleil, commun à toutes les chambres, de 4 m de distance focale. Il était en translation droite/gauche pour déplacer le Soleil à vitesse constante sur la fente du spectrographe (moteur M). On voit le porte plaques 13 x 18 cm² (P et moteur M') pour H α et la fente de sortie associée F' dans le spectre. F est la fente d'entrée commune. L'instrument d'aujourd'hui en garde les principes de base mais a été rénové à plusieurs reprises. Crédit OP.

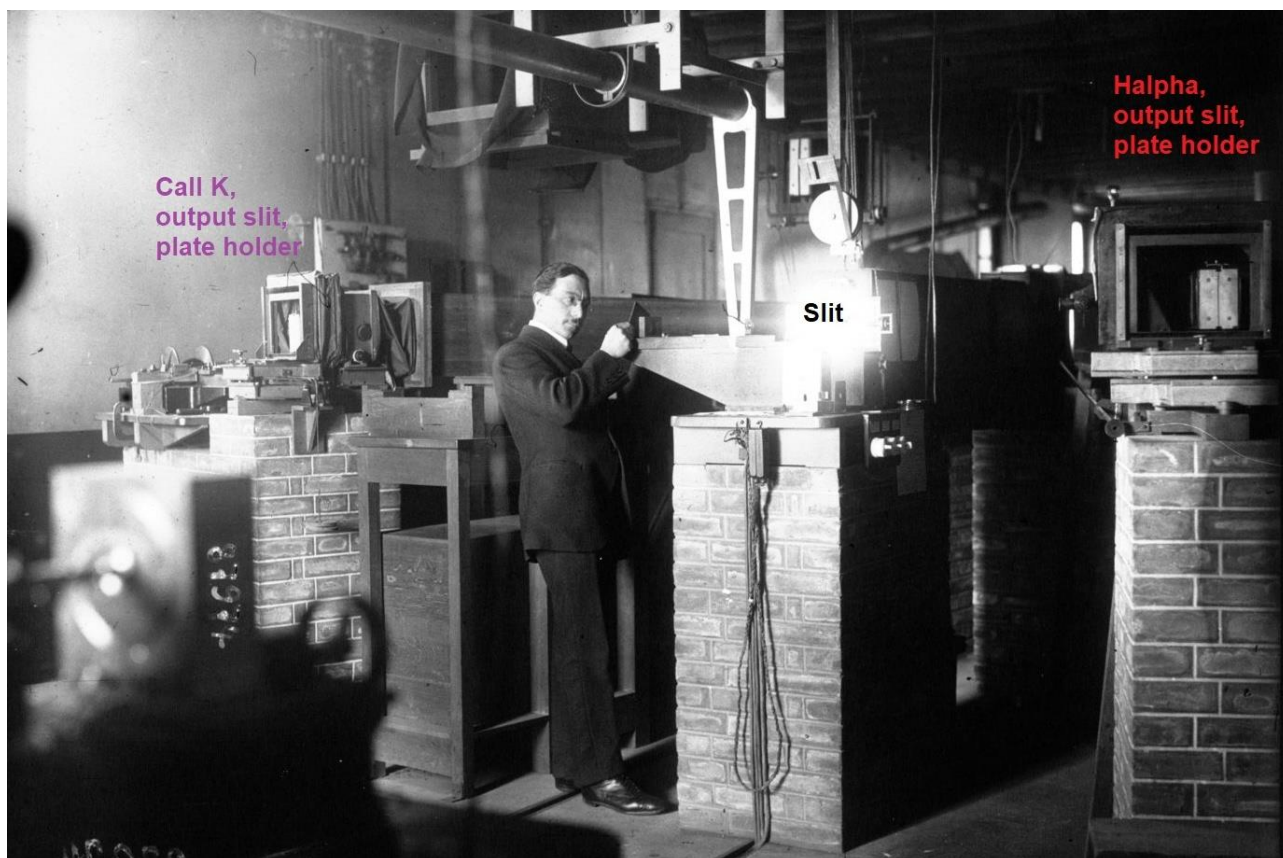


Figure 28 : Lucien d'Azambuja en observations en 1921. A gauche, la chambre Calcium, à droite la chambre Hydrogène H α , on distingue les fentes associées dans le spectre et les porte-plaques. Crédit Gallica/BNF.

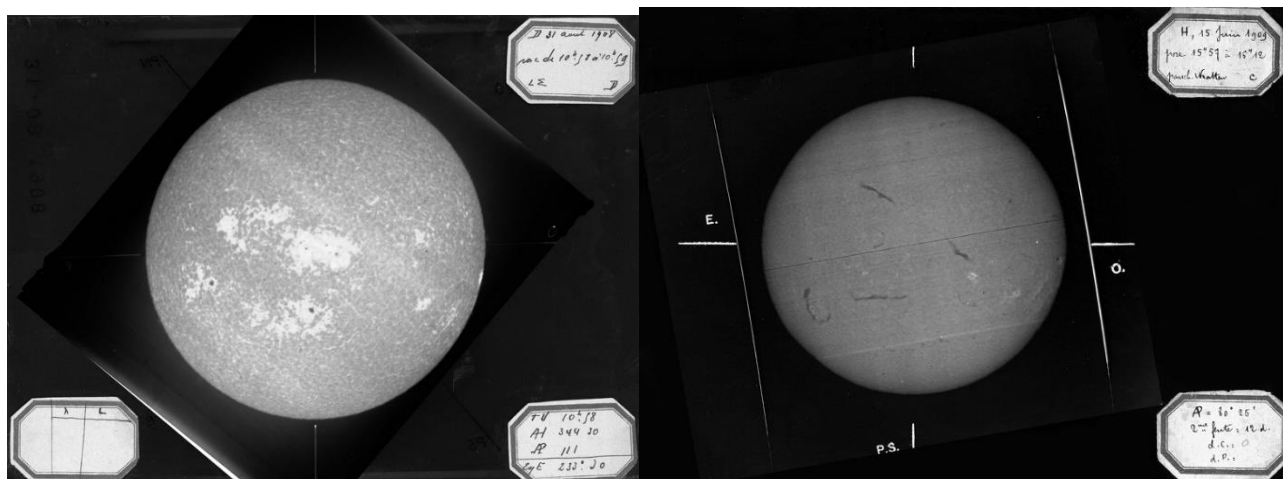


Figure 29 : Les premiers spectrohéliogrammes de l'immense collection du spectrohéliographe de Meudon (1908-2024), à gauche en Calcium (1908) et à droite dans l'Hydrogène H α (1909). Crédit OP.

D'azambuja fut chargé d'organiser un service d'observations quotidiennes et systématiques dès 1908 (figures 28 et 29). On enregistrait des images de l'atmosphère solaire dans deux raies, du Calcium et de l'Hydrogène, qui donnent une vision synthétique des phénomènes en cours. En 2024, ce service est toujours actif, mais il est numérique depuis l'an 2000. Il a enregistré plus de cent mille clichés, les plaques de verre et les plans film 13 x 18 cm² anciens ayant été passés au scanner (figure 30). On peut y accéder via le portail <http://bass2000.obspm.fr>. Marguerite d'Azambuja (figure 31) succéda à Lucien, son mari, à la tête du service lors de son départ en retraite en 1954 ; elle-même partit en 1959, et c'est Marie-Josèphe Martres (figure 31) qui continua, avec Gualtiero Olivieri ; puis Elisabeth Nesme-Ribes ; actuellement c'est Isabelle Bualé qui est en charge, ce qui montre bien que l'observation solaire est tout autant une histoire de femmes que d'hommes.

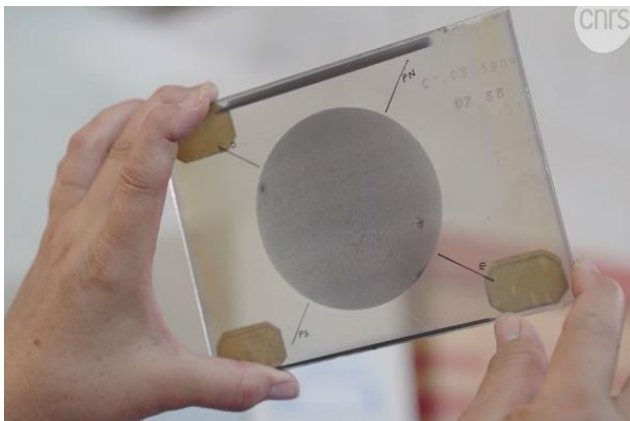


Figure 30 : plaque photo typique en verre du spectrohéliographe, format 13 x 18 cm², négatif, Soleil de 86 mm de diamètre. Des plans film ont ensuite succédé aux plaques de verre avant qu'une caméra numérique ne prenne le relais en l'an 2000. Les plaques et films ont été digitalisés au scanner.

Crédit OP.



Figure 31 : Marguerite d'Azambuja (à gauche) et Marie-Josèphe Martres (à droite). Crédit OP.



L'histoire des observations solaires est émaillée d'un certain nombre d'évènements rares, comme la grande éruption de la **figure 32**. A cette époque, dit-on, « l'observation était, avec la cueillette des champignons, une distraction favorite du directeur (André Danjon); il était là lors de la grande éruption du 25 Juillet 1946, et les ordres qu'il donnait ne contribuaient pas à faire garder leur sang froid aux observateurs ».

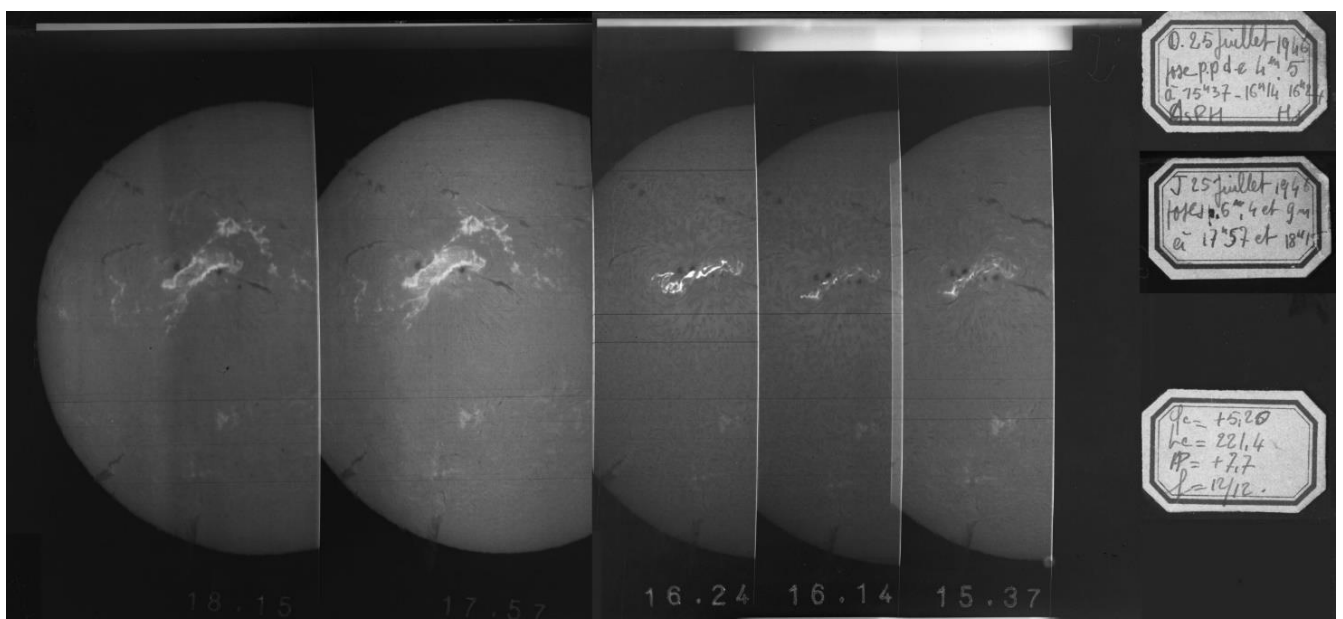


Figure 32 : grande éruption solaire du 25 Juillet 1946 à 5 instants successifs (montage). Crédit OP.

Le nombre de taches présentes sur la surface du Soleil est comptabilisé depuis 1750 par l'observatoire royal de Bruxelles ([figure 33](#)), connu avec précision depuis 1700, estimé depuis 1650, permettant d'y voir le cycle de 11 ans en action (et sa modulation centennale). Plus récemment, depuis le début du XX^{ème} siècle, les spectrohéliogrammes apportent une contribution nouvelle et riche sur l'évolution des structures solaires (taches, régions actives, filaments, protubérances) grâce à un enregistrement photographique fidèle ([figure 34](#)).

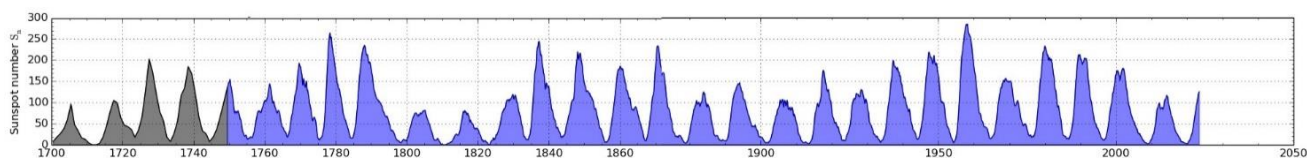


Figure 33 : comptage des taches depuis 1700. Crédit SIDC, observatoire royal de Bruxelles.

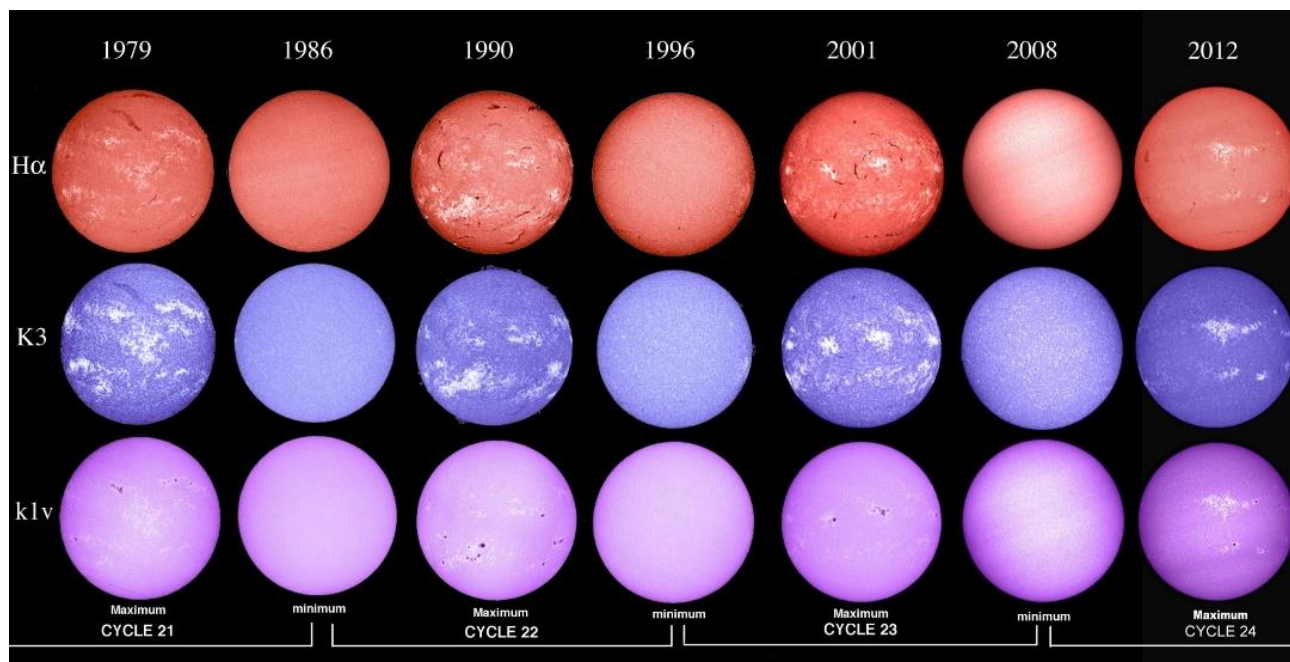


Figure 34 : extrait de la collection d'images monochromatiques de Meudon dans les raies de l'Hydrogène et du Calcium, vision à trois altitudes, sur trois cycles solaires. Crédit OP.

Entre 1930 et 1950, c'est Bernard Lyot (1899-1952, [figure 35](#)) qui va s'illustrer avec deux inventions remarquables qui ont fait le tour du monde astronomique et qui équipent encore aujourd'hui bien des instruments au sol et dans l'espace : il s'agit du coronographe et du filtre monochromatique.



Figure 35

Bernard Lyot et son premier coronographe, fixé ici sur la monture de la carte du ciel à Paris. Crédit OP.



On dit de Lyot qu'il était « un homme charmant et timide malgré sa célébrité (il était devenu académicien). Il venait travailler en vélosolux ou dans une vieille Citroën B12 lorsqu'il amenait sa paire de caniches. Sa distraction était proverbiale, s'il vous empruntait quelque chose, il valait mieux le suivre et récupérer l'objet avant qu'il n'ait fait le voyage du Pic du Midi... ». Le coronographe vit le jour en 1930 à Meudon. On sait que jusqu'ici, la couronne solaire n'est observable qu'au cours des éclipses totales. Le coronographe est un instrument dont la formule optique est spécialement conçue et optimisée pour observer la basse couronne solaire (un million de fois moins lumineuse que le disque), en dehors des éclipses, à condition de bénéficier d'un ciel pur qu'on ne trouve qu'en haute montagne. C'est la raison pour laquelle l'appareil fut monté à Meudon, mais testé et utilisé au Pic du Midi à 2870 m. Cependant, Lyot compléta en 1950 le coronographe par un coronomètre capable d'isoler la composante lumineuse polarisée de la couronne, permettant de l'observer même par ciel diffus, et même en plaine. La seconde invention remonte à 1933, il s'agit du filtre monochromatique biréfringent (figure 36). Si le coronographe permet d'observer la basse couronne en lumière blanche dans de bonnes conditions, il faut lui adjoindre un filtre permettant d'isoler les raies spectrales émises par les structures solaires visibles au limbe, issues des protubérances froides (raies de l'Hydrogène, 8000 degrés) ou des boucles magnétiques chaudes (raies du Fer hautement ionisé, 1 million de degrés, figure 37), sans quoi il n'est pas possible de les discerner. Le filtre est également capable d'isoler les raies d'absorption du disque solaire qui dévoilent les filaments sombres et régions actives, mais reste moins sélectif que le spectrohéliographe de Deslandres et d'Azambuja, basé sur la spectroscopie. Ces deux inventions de Lyot ont révolutionné la physique solaire, elles ont été adoptées par la majorité des observatoires dans le monde, et on les retrouve même sur des satellites ou instruments spatiaux modernes (coronographes de SOHO, 1996, et de STEREO A et B, 2006 ; filtre d'Hinode, 2006...).

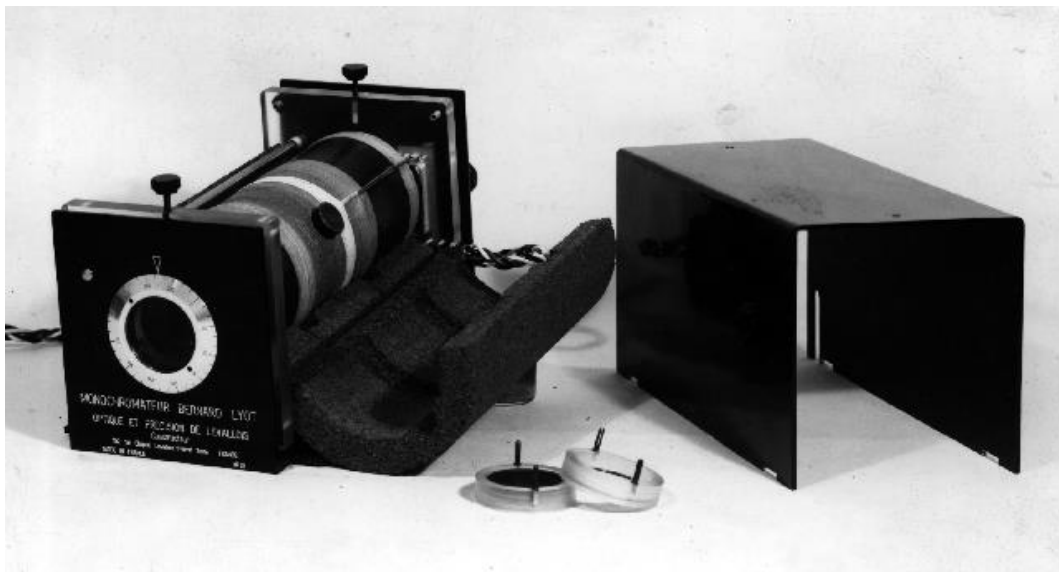


Figure 36 : exemplaire de filtre monochromatique de Lyot fabriqué en série par la firme Optique de Précision Levallois (OPL) pour équiper les observatoires. Crédit OP.

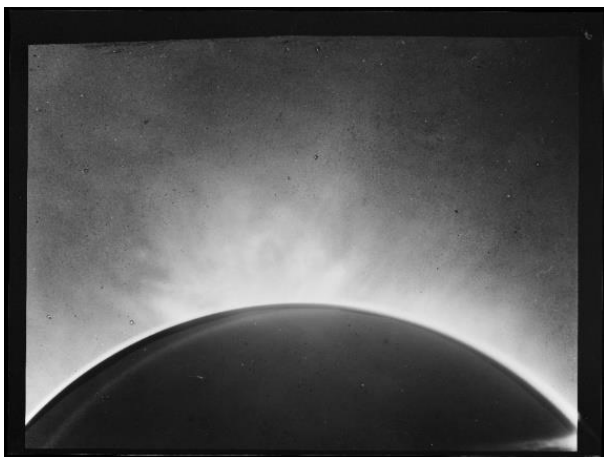


Figure 37

Image monochromatique, dans la raie verte du Fer 13 fois ionisé, des boucles magnétiques chaudes de la basse couronne solaire observées avec un filtre de Lyot installé sur le coronographe du Pic du Midi en 1941. Le disque solaire est masqué par un cône occulteur, pièce maîtresse (avec l'optique non diffusante) de l'instrument. Crédit OP.

Le nouveau filtre de Lyot avait des performances exceptionnelles, puisqu'il permettait de produire des images monochromatiques et instantanées de régions du Soleil beaucoup plus rapidement que le spectrohéliographe (car celui-ci balaie lentement avec une fente fine la surface du Soleil, mais en contrepartie dispose d'une meilleure sélectivité spectrale). En effet, à un instant t , un filtre fournit une image (x, y) pour une valeur de la longueur d'onde λ , tandis qu'un spectrographe donne un spectre (λ, x) , il faut alors balayer le Soleil selon l'axe y avec la fente d'entrée. Lyot pu exploiter cet avantage en démarrant en 1937, au Pic du Midi, un programme de cinématographie des protubérances dans la raie rouge de l'Hydrogène (figure 38, et film MP4 associé). Lyot associa à ce travail le cinéaste professionnel Joseph Leclerc.

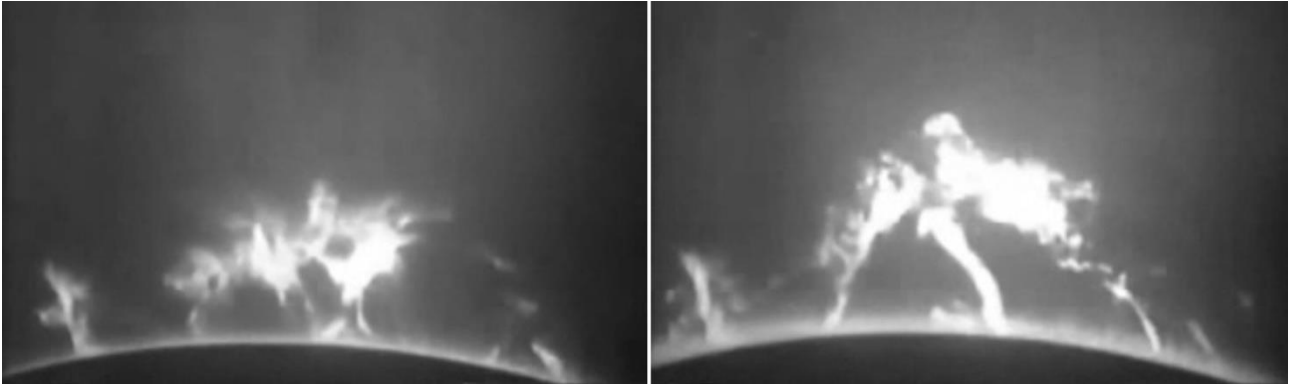


Figure 38 : bel exemple de cinématographie des protubérances avec le coronographe et le filtre monochromatique de Lyot, dans la raie rouge $H\alpha$, avec extrait d'un film MP4 associé. Crédit OP.

<https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/HY/Media2.mp4>

Les possibilités cinématographiques des filtres de Lyot ont ensuite été mises à profit dans le cadre de l'année géophysique internationale de 1957. Il s'agissait alors de filmer les éruptions sur le disque au voisinage du maximum d'activité solaire. Lyot était décédé malencontreusement en 1952, mais Henri Grenat et Gérard Laborde mirent au point en 1954 un héliographe monochromatique (figure 39) basé sur un filtre de Lyot (figure 36) et fonctionnant dans la raie rouge de l'Hydrogène. Il enregistrait les images sur des bobines de film 35 mm de 45 m de longueur (figure 39, film MP4 associé figure 40).



Figure 39

Héliographe monochromatique de Grenat et Laborde pourvu d'un filtre de Lyot pour cinématographier les éruptions à l'occasion de l'année géophysique internationale de 1957. Ci dessous, une bobine de film 35 mm. Des milliers de bobines de 45 m ont été exposées par la suite. Crédit OP.

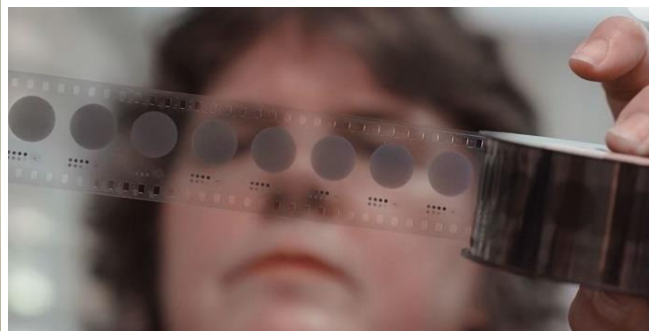




Figure 40 : exemple de cinématographie des éruptions avec un filtre de Lyot, en 1957 (crédit OP). Film :

<https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/HY/Media3.mp4>

Il fut décidé, dans le cadre de la surveillance des éruptions au sein du programme de l'année géophysique internationale de 1957, de dupliquer l'héliographe à filtre de Lyot pour équiper de nombreux observatoires autour du monde. Cette tâche fut confiée à aux entreprises SECASI (Bordeaux), qui réalisa 6 montures avec lunette, et OPL (Levallois), qui fit plus de 10 filtres monochromatiques pour la raie rouge de l'Hydrogène. L'un de ces instruments ([figure 41](#)) fut placé à l'Observatoire de Haute Provence où il fonctionna de 1958 à 1994. L'instrument original de Meudon fut rénové plusieurs fois, avec des filtres de plus en plus perfectionnés, et tourna de 1956 à 2004. En particulier, des filtres ajustables pour explorer non seulement les cœurs des raies, mais aussi leurs ailes, furent employés, dans le but d'estimer les mouvements de matière par effet Doppler. Au total, 7 millions d'images ont été prises à Meudon et à l'OHP, dont 6 millions sur film (3000 bobines de 45 m, soit 130 km) et 1 million avec détecteur numérique CCD.

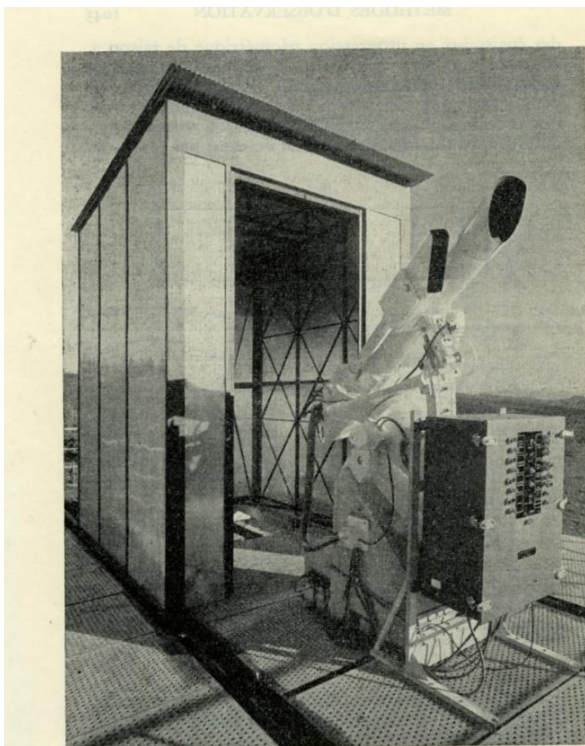


FIG. 6. — HÉLIOGRAPHE MONOCHROMATIQUE D'APRÈS LYOT, POUR LA CINÉMATOGRAPHIE DE LA CHROMOSPHERE SOLAIRE (MODÈLE SECASI).
(Cliché de l'Observatoire de Haute-Provence.)

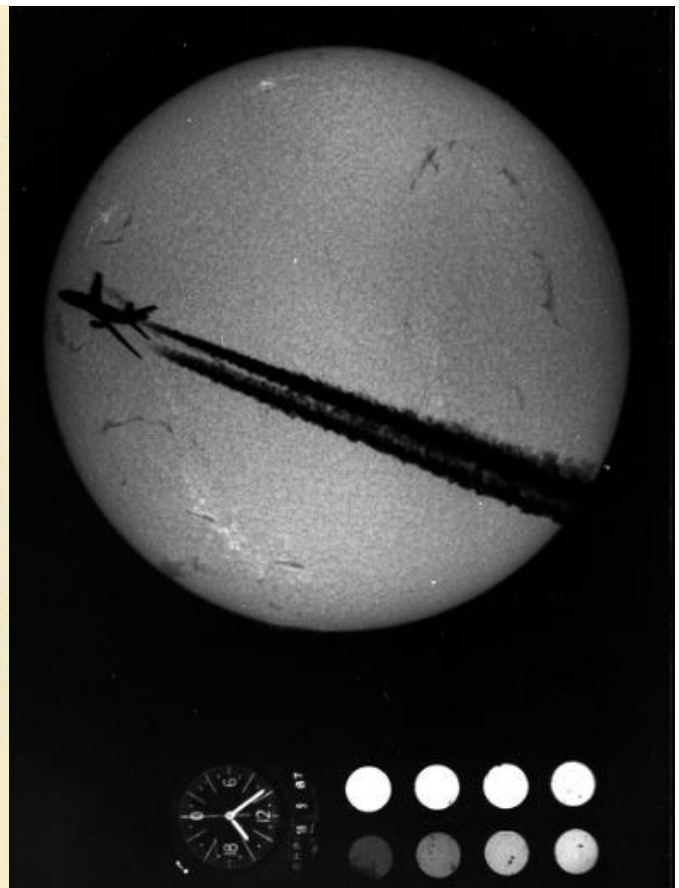


Figure 41 : héliographe H α SECASI/OPL de l'observatoire de haute provence (crédit OP).

Venons en maintenant à la radioastronomie. Le premier signal radio d'origine solaire a été identifié en 1942 par James Hey en analysant les signaux captés par les radars militaires anglais durant la seconde guerre mondiale. Les allemands ayant construit 1500 radars Würzburg-Riese de 7.50 m de diamètre au cours du conflit, quelques exemplaires (figure 42) furent récupérés après 1945 à des fins scientifiques.

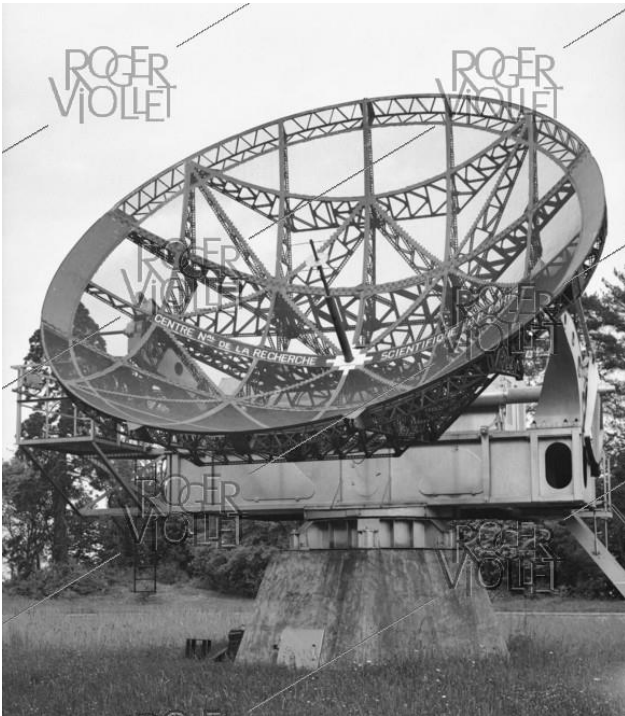


Figure 42

A gauche, radar Würzburg installé à Meudon en 1949. Crédit Roger-Viollet.

Ce dessous, les deux radars Würzburg installés à Nançay en 1953 sur des rails, permettant de varier leur distance. Crédit OP.

L'antenne de Meudon a été par la suite transférée à l'observatoire de Bordeaux. Une antenne subsiste à Nançay, la seconde ayant été cédée au musée radar de Douvres la Délivrande dans la Calvados, près de Caen.



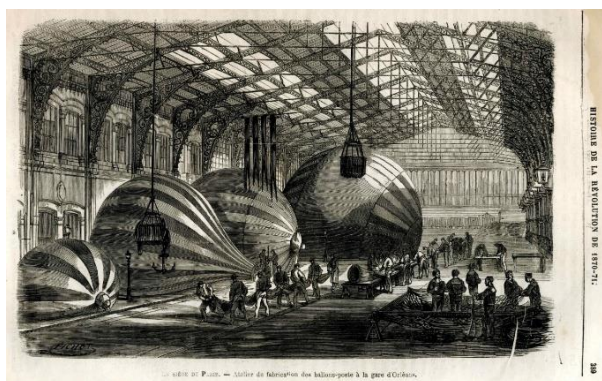
Ces radars fonctionnaient sur la longueur d'onde de 55 cm. Celui de Meudon fut transformé en antenne radio solaire par Marius Laffineur en 1949. La station de radioastronomie de Nançay fut créée peu après en 1953 sous l'impulsion d'Yves Rocard à l'Ecole Normale Supérieure, qui soutint Jean-François Denisse, Jean-Louis Steinberg et Jacques-Emile Blum dans cette tâche novatrice ouvrant une fenêtre nouvelle sur l'univers.

En parallèle de l'observation au sol, l'apparition des ballons a incité les astronomes à tenter des expériences nouvelles et audacieuses. Le ballon permet en effet de s'élever à haute altitude, au dessus de la majeure partie de l'atmosphère terrestre, permettant de capter des rayonnements ne parvenant pas au sol ou d'améliorer la qualité des images en éliminant la turbulence de l'air (ce qui peut être compliqué par les vibrations du ballon). Le premier vol entrepris par un astronome remonte au 2 Décembre 1870. Paris étant assiégé par les Prussiens, Jules Janssen obtint du gouvernement la mise à disposition d'un ballon pour échapper aux lignes ennemies et aller observer une éclipse de Soleil en Algérie, à Oran ([figure 43](#)). Ce fut la seule expédition scientifique des 70 ballons montés du siège de Paris.

Figure 43

Ci-dessous, la gare d'Orléans à Paris est transformée en hangar de montage de ballons lors du siège de Paris en 1870.

A droite, la stèle de la statue de Janssen sur la première terrasse de Meudon, située en contrebas de celle de l'observatoire. Janssen s'envole à bord du ballon monté « le Volta » avec ses instruments pour l'observation d'une éclipse totale à Oran.



Les ballons montés ne sont pas dirigeables, mais soumis aux vents. Janssen s'envola de nuit, dans la discrétion, accompagné d'un militaire chef de bord et de son matériel scientifique, il fit un vol sans encombre poussé par le vent qui soufflait en direction de l'océan atlantique, et pilota parfois lui-même. Il fit atterrir son ballon vers Saint Nazaire. Voici ce qu'il écrivit plus tard sur son expédition : « un train spécial me conduisit à Nantes et de là, je me rendis à Tours où j'arrivai à 11 heures du soir. J'étais parti de Paris à 6 heures du matin. De Tours je me dirigeai vers Bordeaux et Marseille où je m'embarquai pour Oran, où le bruit se répandit bientôt qu'un grand Gastronome français venait d'arriver en Algérie ! ». Malheureusement, cette aventure extraordinaire restera infructueuse en raison de la couverture nuageuse le jour de l'éclipse... Le ballon « Le Volta » a été par la suite conservé à Meudon, puis donné par Mme Janssen au musée de l'armée après le décès de son mari en 1907.

Quelques années plus tard, Aymar de la Baume Pluvinel, un astronome amateur chevronné et collaborateur assidu de Jules Janssen, instrumenta un ballon sans passager ([figure 44](#)) qui atteignit l'altitude de 9000 m et sera récupéré à la descente. Il s'agissait d'approfondir les recherches faites au Mont Blanc sur les raies de l'Oxygène du spectre solaire. Le ballon emportait un spectroscopie avec plaque photo qui permit de corroborer les observations du Mont Blanc, à savoir la décroissance en intensité de ces raies, pouvant être attribuées désormais avec certitude à l'atmosphère terrestre.



Figure 44 : le ballon instrumenté d'Aymar de la Baume Pluvinel, dans la cour des communs du Château à Meudon, atteint 9000 m d'altitude en 1899 (crédit OP).

Les péripéties suivantes furent le fait d'Audouin Dollfus, célèbre aéronaute, tout comme son père Charles Dofffus. En 1956, Dollfus entreprit la première observation de la surface du Soleil à l'aide d'une grande lunette attachée à la nacelle du ballon, qui monta à 6000 m d'altitude, avec son passager ([figure 45](#)). Pourquoi cette tentative ? Au sol, on ne pouvait guère faire mieux que les (déjà beaux) clichés de granulation de l'atlas de Janssen, parce que l'atmosphère terrestre est turbulente et brouille les images astronomiques. Si

l'on veut améliorer la qualité des images, à l'époque le seul moyen était le recours à la haute montagne, ou mieux le ballon, pour réduire plus nettement la colonne d'air au dessus de l'observateur.



22 novembre 1956

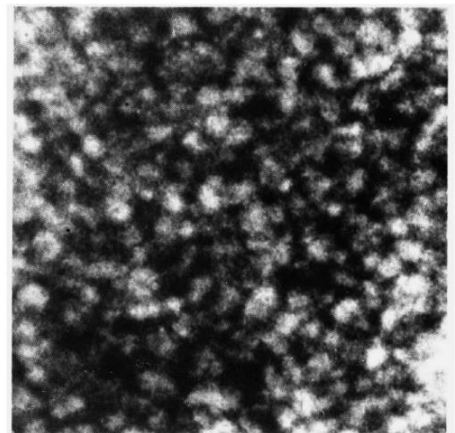


Fig. 228. — La première photographie astronomique réalisée hors de la surface terrestre :
— la granulation solaire en ballon à l'altitude de 6000 mètres, le 1^{er} avril 1957.



Audouin Dollfus en 1956

Figure 45

Audouin Dollfus observe la granulation solaire à 6000 m d'altitude. Une lunette de 30 cm de diamètre et 3 m de focale est soutenue par la nacelle et l'instrument est piloté par l'aéronaute. Cette expérience permettra à Dollfus de rapporter des photographies inédites dont la finesse est alors inégalée, grâce à la réduction des perturbations engendrées par la turbulence de l'air atmosphérique. Une première mondiale ! Crédit OP.

L'observation à 6000 m d'altitude s'avéra être un grand succès. Aéronaute passionné, Dollfus rêvait d'une expérience à 25000 m d'altitude avec un télescope instrumenté et commandé depuis une capsule pressurisée emportant l'opérateur. Bien que ce projet concernait l'astronomie nocturne, nous le mentionnons car il est dans la démarche du projet d'observation solaire à 6000 m. Pour la très haute altitude, Dollfus s'orienta vers la technologie multi-ballons comportant une longue grappe de 100 petits ballons. Il testa aussi des ballons dilatables (figure 46) sous le hangar Y de Chalais-Meudon (ancien hangar à dirigeables aujourd'hui restauré). Il s'envola en 1959 depuis Villacoublay et atteignit l'altitude de 14000 m avec la capsule et le télescope. Même si ce n'était pas les 25000 m escomptés, c'était déjà un fameux record, relaté par un film en ligne à l'Institut National de l'Audiovisuel (figure 47).

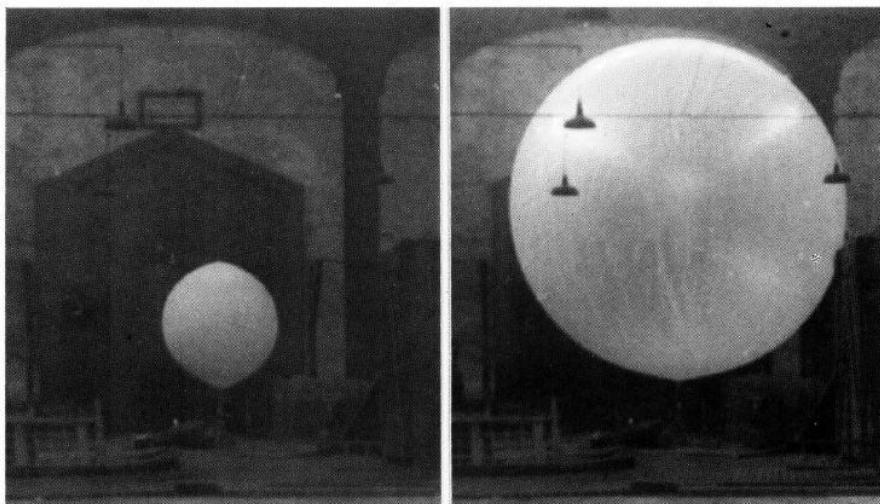


Figure 46

Ballons dilatables testés par Audouin Dollfus dans le hangar Y de Chalais-Meudon dans le but d'atteindre 25000 m d'altitude.

Fig. 233. — Essai des gros ballons sondes dilatables en caoutchouc.

A gauche : configuration avant l'envol, gonflé avec 7 m³ d'hydrogène. A droite : configuration à 25 000 mètres d'altitude, après dilatation du gaz (remplacé ici par de l'air soufflé). Sous le grand hangar de Chalais Meudon, mars 1956.

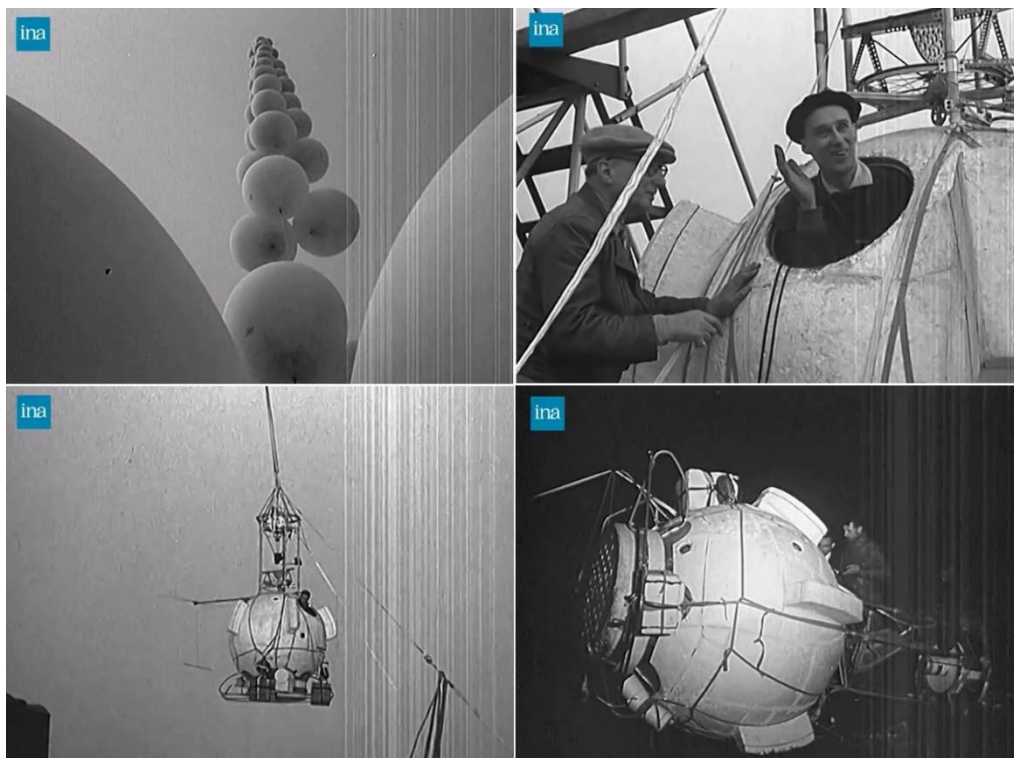


Figure 47 : capsule et télescope d'Audouin Dollfus, vol de 1959, film en ligne sur le site de l'INA

Extrait : <https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/HY/Media4.mp4>

<https://www.ina.fr/ina-eclaire-actu/video/afe85008273/audouin-dollfus-monte-a-13000-metres-en-ballon>

Dollfus peut ainsi être considéré comme pionnier de l'astronomie spatiale en France. L'aventure continua avec le CNES après sa création en 1961. Un coronographe à occultation externe automatisé put observer la couronne lors de plusieurs vols (non habités) à 32000 m d'altitude (figure 48).



COURONNE SOLAIRE LE 29 JUIN 1973
la veille de l'éclips totale de Soleil
Photographie obtenue à 32 000 mètres d'altitude
par ballon stratosphérique
Laboratoire "Physique du Système Solaire" de
l'Observatoire de Paris - MEUDON

Figure 48

Coronographe à occultation externe d'Audouin Dollfus lancé d'Aire sur Adour en 1973 avec le CNES

4 – Après 1960 : la physique solaire spatiale ouvre une nouvelle fenêtre sur le Soleil

A partir des années 60, on construit de grands instruments solaires à petit champ (figure 49).

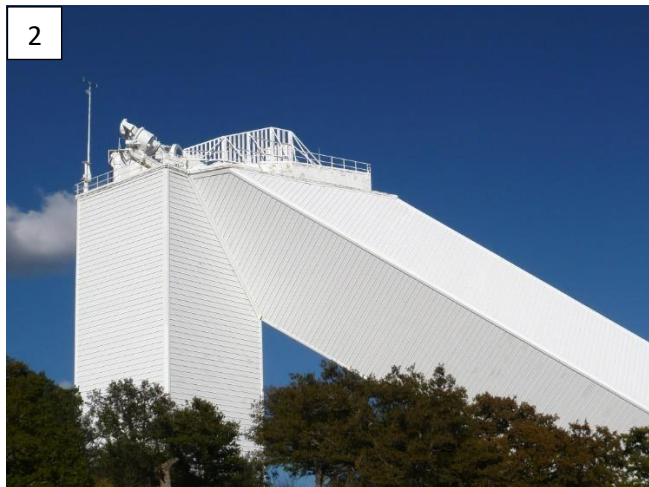
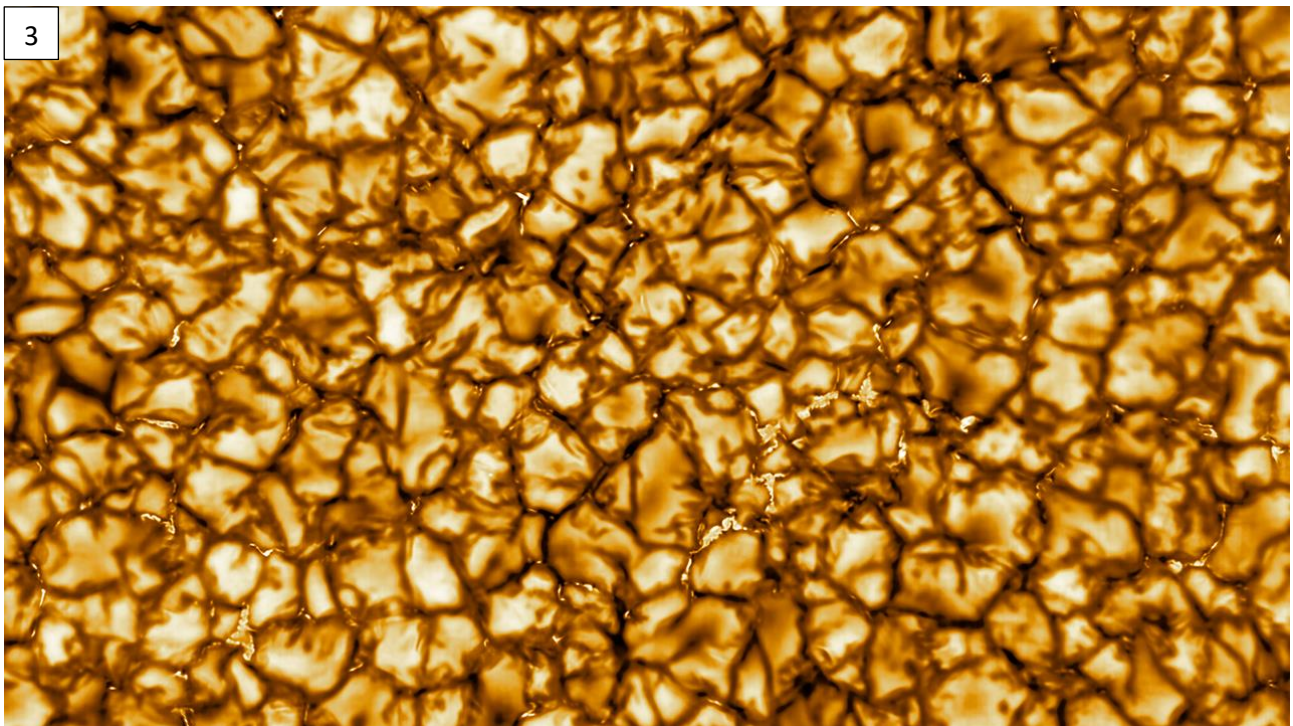
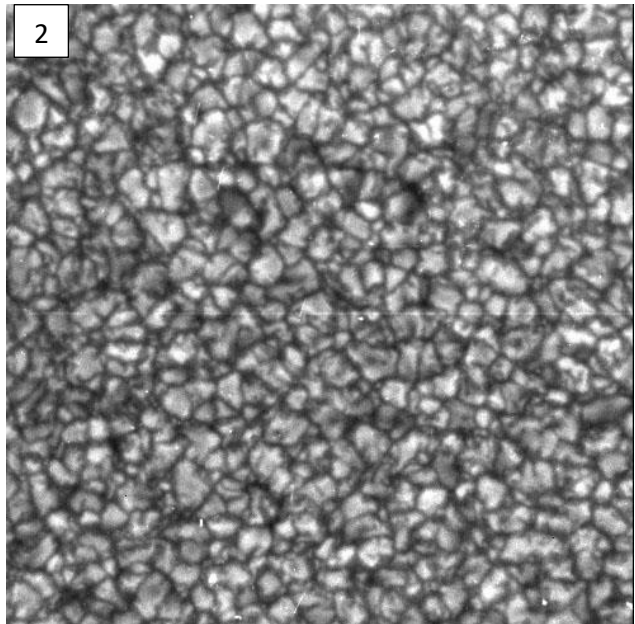
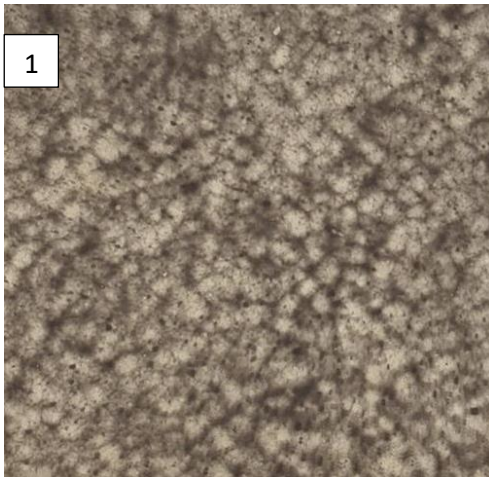


Figure 49 : quelques grands télescopes solaires construits à partir des années 60, (1) Vacuum Tower Telescope (Allemagne), (2) Kitt Peak (USA), (3) THEMIS (France), (4) Sacramento Peak (USA)

Ces grands télescopes ont des champs de vue réduits et sont conçus pour discerner des détails de plus en plus petits (figure 50), notamment avec l'optique adaptative au tournant de l'an 2000. Le plus grand télescope solaire est aujourd'hui l'américain DKIST avec un miroir de 4 m de diamètre.

Figure 50 : granulation solaire observée par Janssen 1880 (1), au Pic du Midi vers 1970 (2), et par DKIST à Hawaï en 2020 (3)



L'astronomie spatiale se développa avec des éphémères tirées de fusées et des satellites en orbite qui vont ouvrir une nouvelle fenêtre sur le Soleil grâce à l'observation de nouveaux rayonnements : Ultra Violet (UV) caractéristique des plasmas chauds de la couronne (100 000 à 10 millions de degrés, figure 51), rayons X (figure 52) et rayons γ en tant que signature de phénomènes de haute énergie présents dans les éruptions solaires. Un instrument (SOHO) est placé en 1996 au point de Lagrange L1 à 1.5 millions de km de la Terre pour observer le Soleil en permanence. Un appareil à deux sondes (STEREO A et B, 2006) donne une vision stéréoscopique du Soleil en suivant l'orbite terrestre (parfois les deux hémisphères ont été vus entièrement au même instant). Des sondes interplanétaires se rapprochant du Soleil (Parker Solar Probe, 2018, Solar Orbiter, 2020) sont en cours de mission, avec pour objectifs principaux d'effectuer des mesures « in situ » de paramètres physiques, jusqu'à 10 rayons solaires seulement dans la couronne elle-même, ou bien de sortir du plan de l'orbite terrestre (l'écliptique) pour mieux observer les pôles solaires.

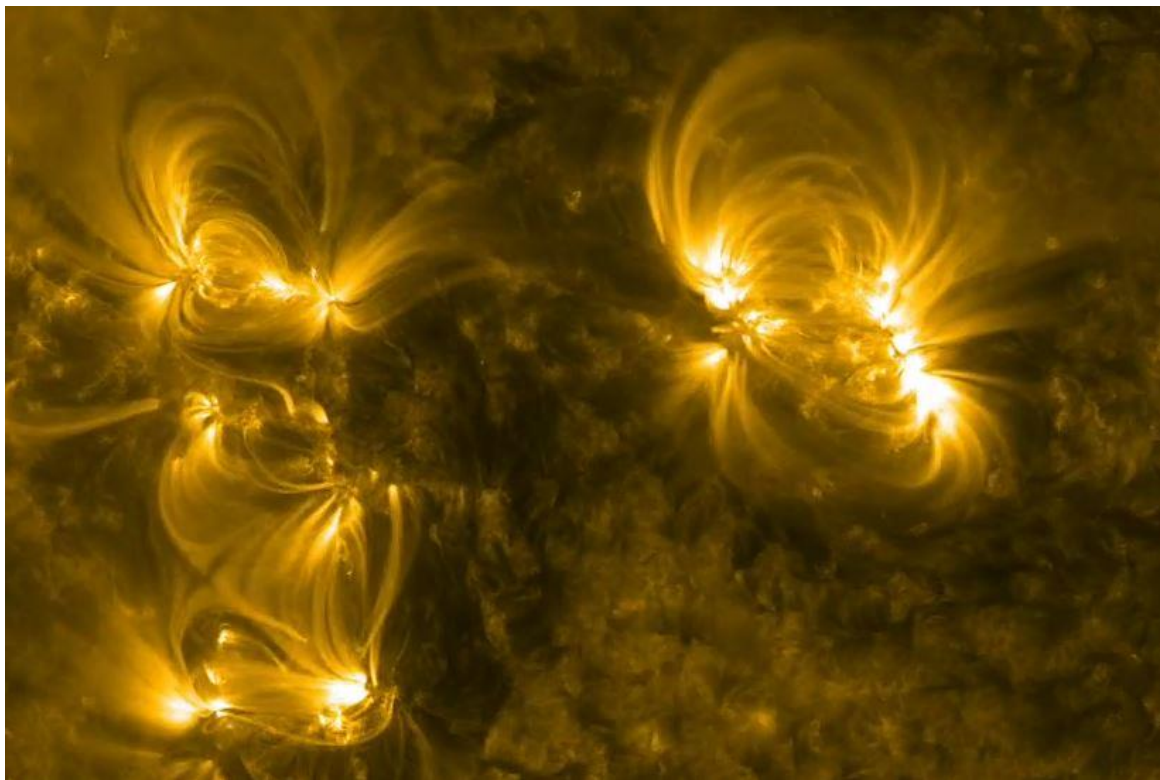


Figure 51 : le Soleil et ses boucles magnétiques en UV, 1 million de degrés (SDO/AIA), avec animation :

<https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/HY/Media5.mp4>

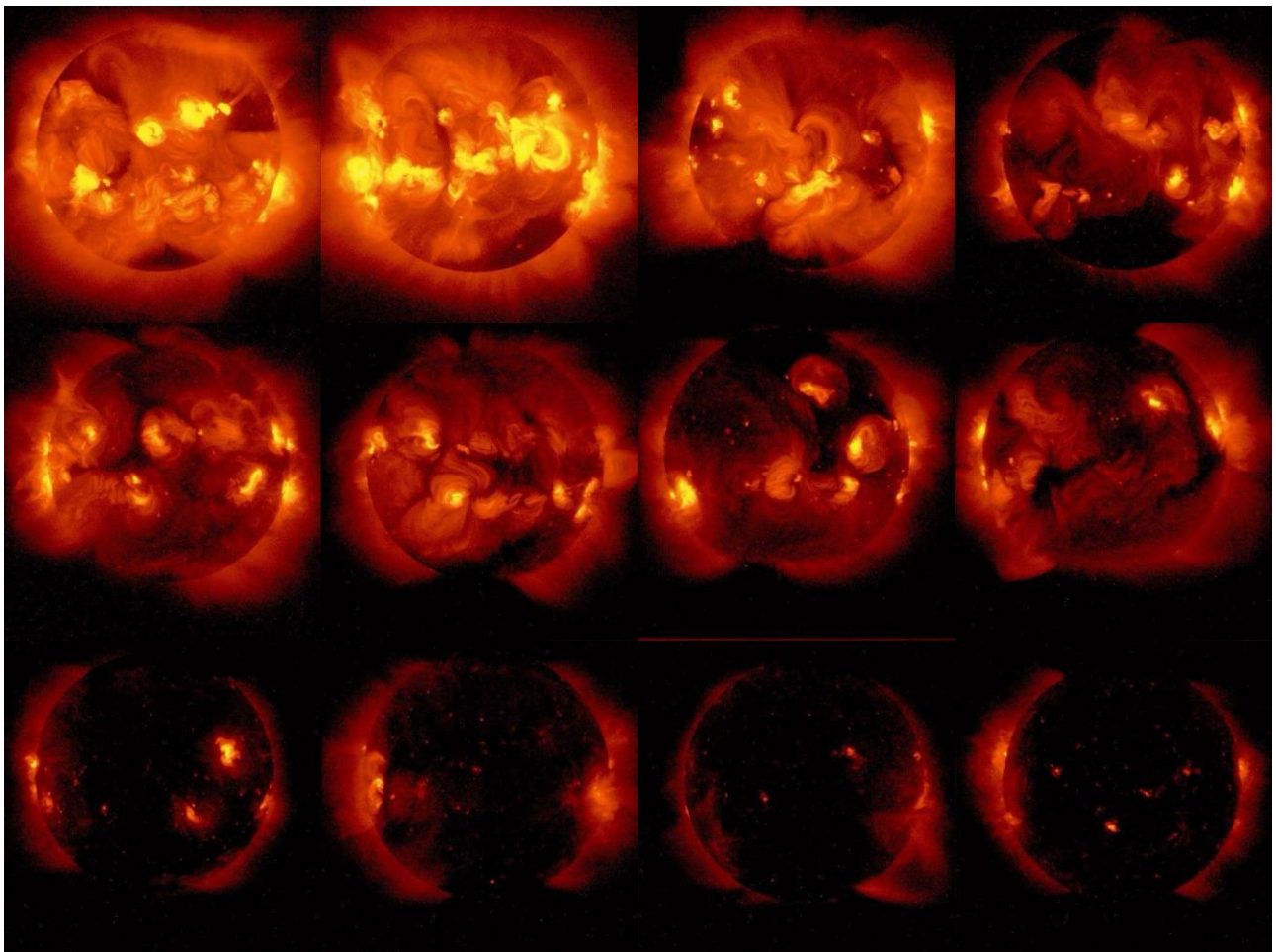


Figure 52 : le cycle solaire en rayons X vu par le satellite japonais YOHKOH de 1990 à 1999. Crédit JAXA.

Le satellite géostationnaire américain Solar Dynamics Observatory, lancé en 2010, qui a pris le relais en Ultra Violet de l'europpéen SOHO, fournit grâce à sa cadence inédite de prise de vues des séquences animées de l'activité solaire, dont les éruptions et les éjections de masse coronale, comme le montrent les figures 53, 54, 55, 56 et 57, avec les animations associées.

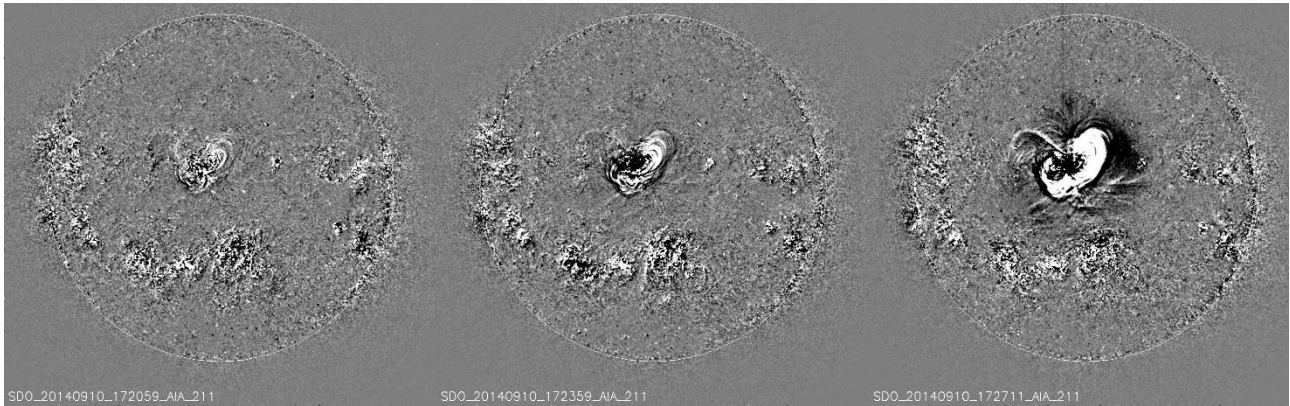


Figure 53 : onde de choc coronale déclenchée par une éruption balayant la basse couronne à la vitesse de 1000 km/s. SDO/AIA, animation : <https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/HY/Media6.mp4>

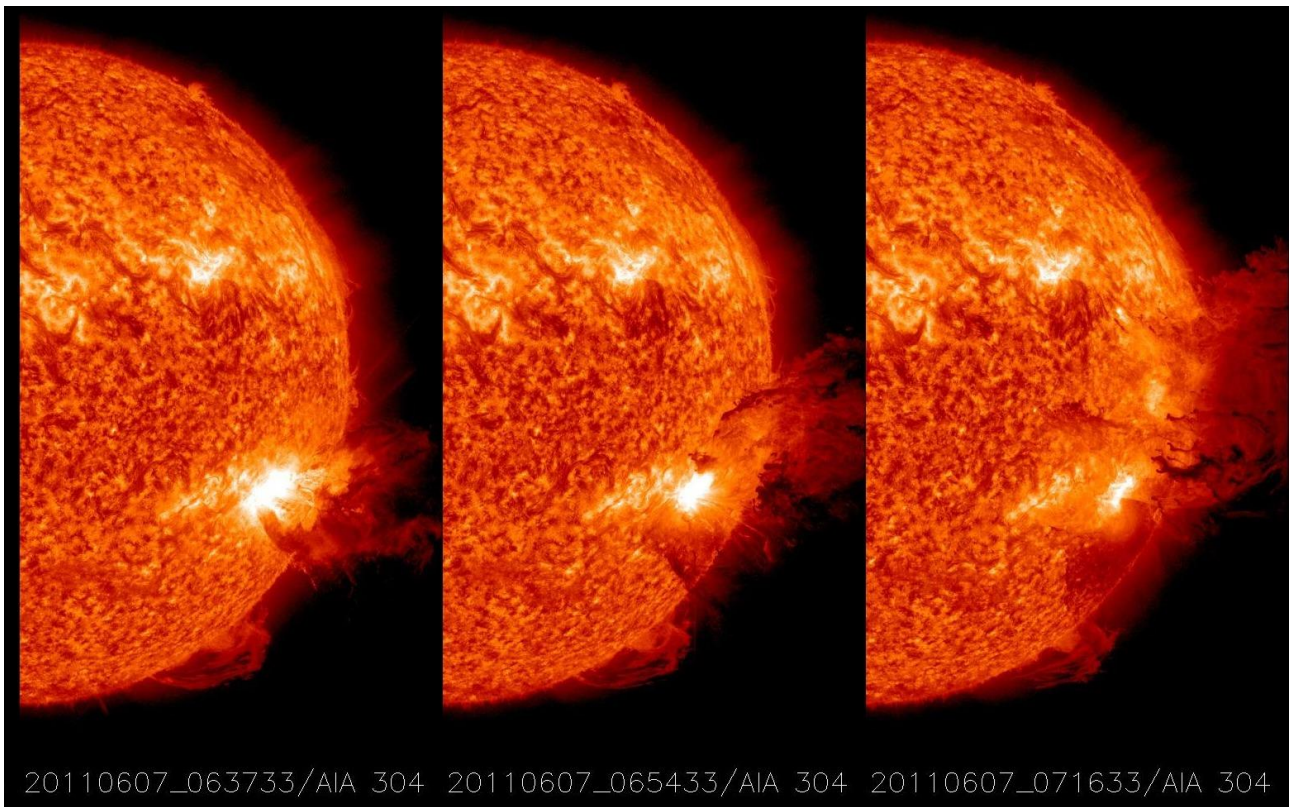


Figure 54 : éjection de masse coronale en Hélium ionisé, 100 000 degrés. SDO/AIA, animation : <https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/HY/Media7.mp4>

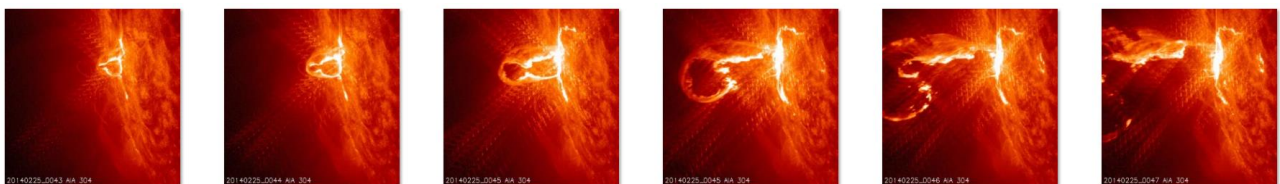


Figure 55 : éjection d'une structure magnétique en Hélium ionisé, 100 000 degrés. SDO/AIA, animation : <https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/HY/Media08a.gif>

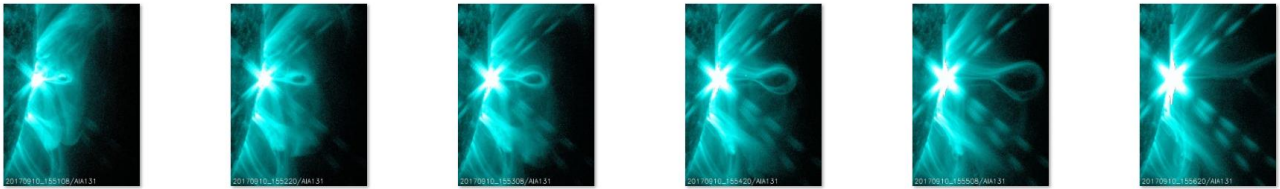


Figure 56 : éjection d'une bulle de plasma, Fer ionisé, 10 millions de degrés. SDO/AIA, animation : <https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/HY/Media08b.gif>

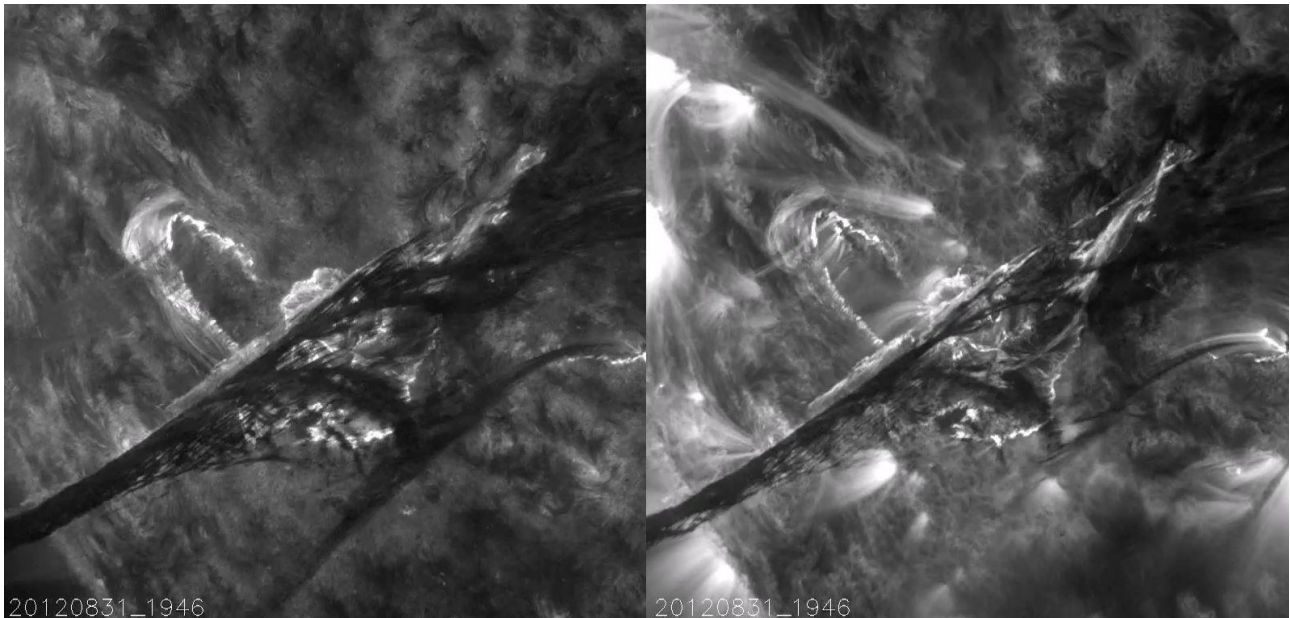


Figure 57 : éjection d'un filament suivie d'une éruption en double filet et formation d'arches magnétiques post éruptives, deux raies pour deux températures, 0.1 et 1 million de degrés. SDO/AIA, animation : <https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/HY/Media8.mp4>

La [figure 58](#) montre la trajectoire de la sonde européenne Solar Orbiter qui gravite en deça de l'orbite de Mercure et sort progressivement du plan de l'écliptique pour observer les pôles solaires, peu visibles depuis la Terre. L'instrument effectue des observations à distance et des mesures « in situ ». Une seconde sonde, l'américaine Parker Solar Probe ([figure 59](#)), mesure les paramètres physiques directement dans la couronne solaire, beaucoup plus près du Soleil que Solar Orbiter.

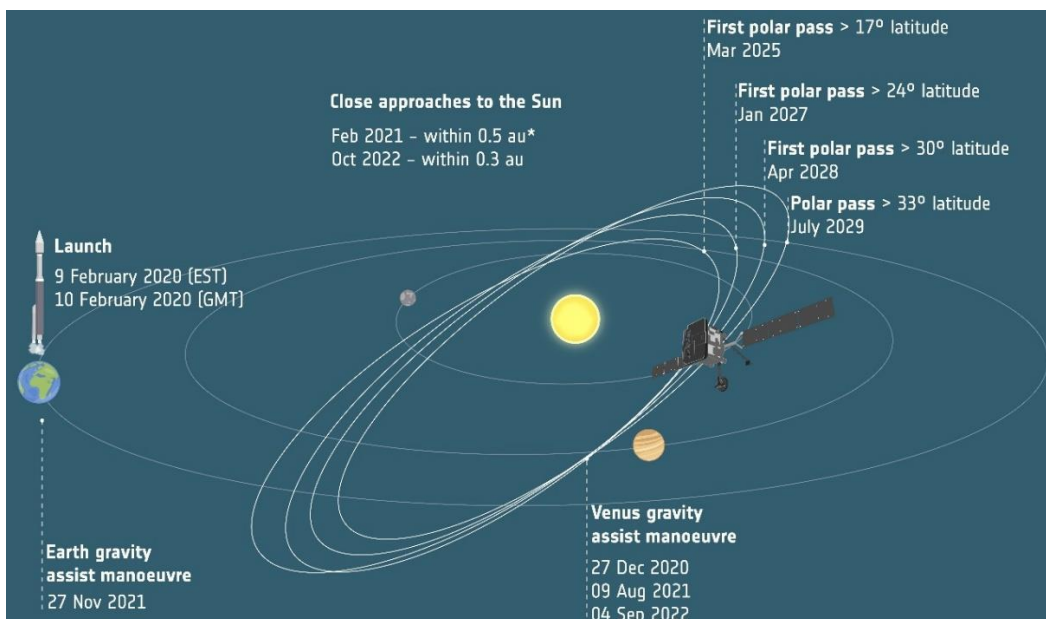


Figure 58

Trajectoire de la sonde Solar Orbiter qui sort du plan de l'écliptique pour mieux voir les pôles solaires. Crédit ESA.

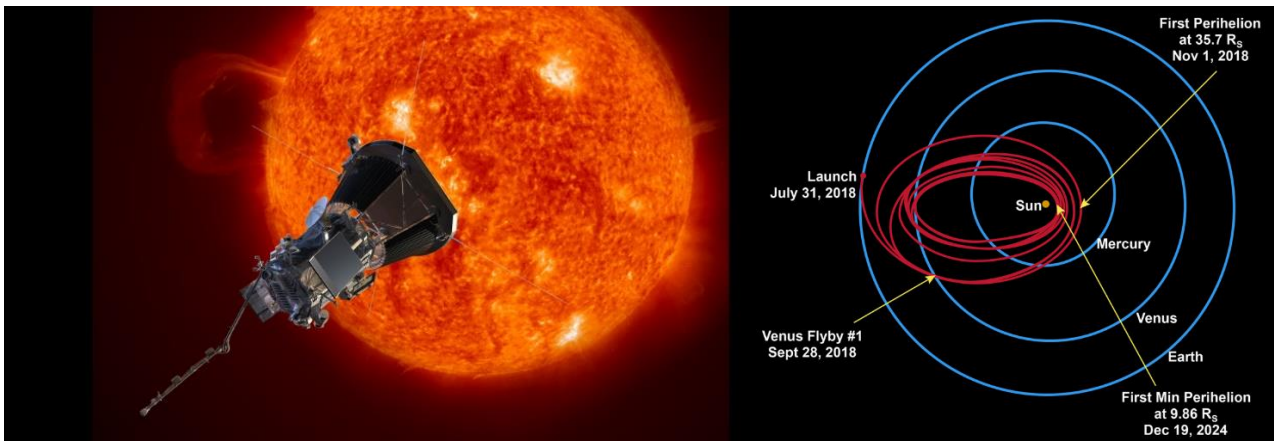


Figure 59 : sonde américaine Parker Solar Probe et sa trajectoire rasant le Soleil. Crédit NASA.

Achevons ce bref panorama de l'observation solaire spatiale par la vision à grand champ que donnent les coronographes LASCO portés par SOHO (ESA/NASA) dont la longévité est exceptionnelle (28 ans). Dans l'espace, on voit beaucoup plus loin qu'avec les coronographes au sol. Le champ de SOHO est de 30 rayons solaires, en lumière blanche (figure 60), ce qui permet de surveiller l'injection de matière solaire dans le milieu interplanétaire et d'estimer son impact possible à la Terre.

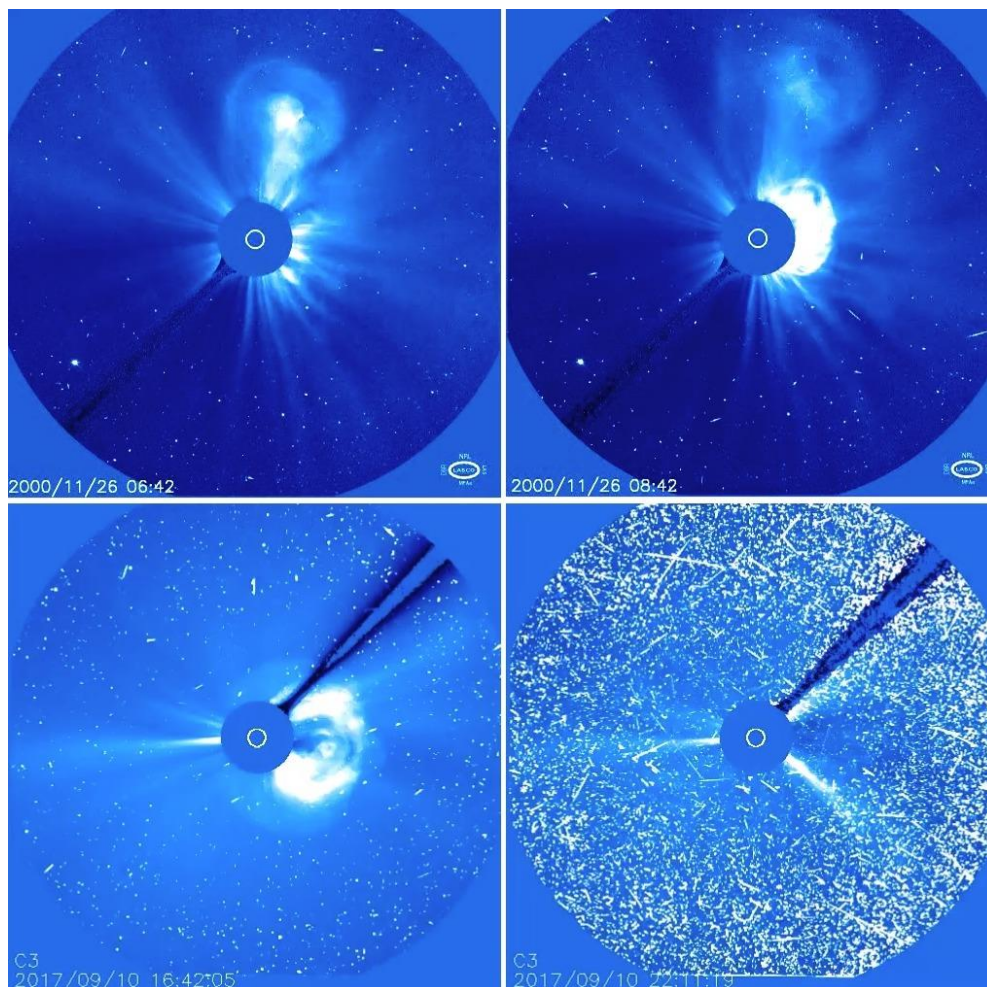


Figure 60 : coronographe C3 de SOHO. En haut : un évènement sans impact à la Terre. En bas : un évènement avec impact à la Terre (remarquer la trace des particules cosmiques). Animations :

Haut : <https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/HY/Media9.mp4>

Bas : <https://www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/HY/Media10.mp4>

Le Soleil, comme le montrent les coronographes C2 et C3 portés par SOHO au point de Lagrange L1, peut donc avoir un impact sur la Terre, en injectant des particules chargées transportées par le vent solaire qui viennent bombarder l’atmosphère terrestre. Le phénomène naturel le plus beau est celui des aurores polaires (figure 61), qui existe sur toutes les planètes disposant d’un champ magnétique (qui piège les particules) et d’une atmosphère ou surface gazeuse.

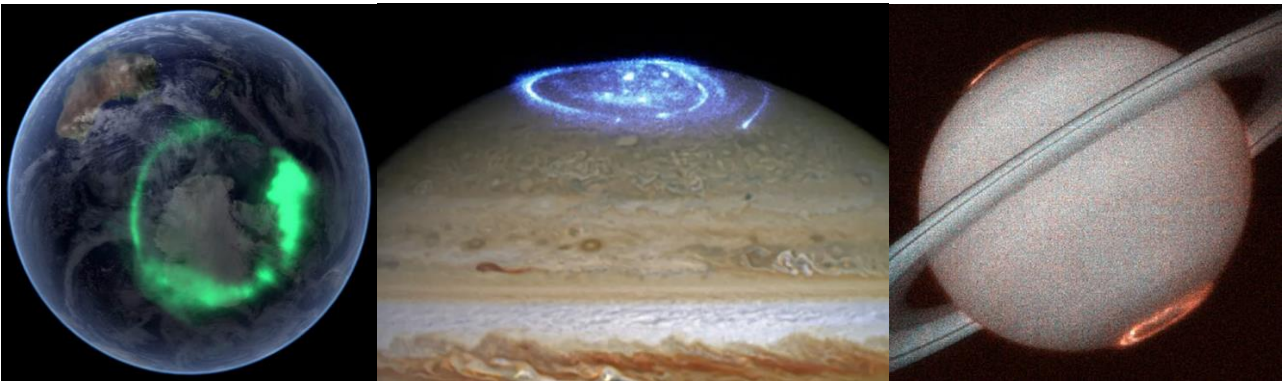


Figure 61 : aurores polaires sur les planètes Terre, Jupiter et Saturne.

5 – Les supercalculateurs à la rescousse des télescopes : naissance d’un nouvel « instrument » dédié à la modélisation numérique

Le développement de l’informatique à partir des années 1970 a permis de passer au traitement numérique des données. Celles des télescopes optiques, sur plan film jusque dans les années 80, étaient numérisées par des micro-densitomètres et enregistrées sur bandes magnétiques. Les données radio sortaient sur traceurs puis sur bande. Dans les instruments en orbite, on utilisa très tôt les capteurs numériques pour transmettre au sol les données par télémesure. On assista bientôt à une explosion du volume des données produites en astronomie, si bien que les gros ordinateurs devinrent des instruments à part entière, aussi indispensables que les télescopes. Cela entraîna des besoins nouveaux en calcul numérique, observations et modélisation allant de pair. Le CNRS créa alors un centre de calcul mutualisé au sein de l’Institut National d’Astronomie et de Géophysique (INAG), ancêtre de l’Institut National des Sciences de l’Univers (INSU). Il fut équipé d’un IBM 360/65 implanté à Meudon (figures 62 et 63) et fonctionna jusqu’à la fin des années 70 où le centre fut démantelé pour laisser place à l’informatique interactive naissante (des VAX sous VMS dès 1980, puis par la suite des systèmes UNIX). Les laboratoires émergeant à l’INAG pouvaient se connecter à ce moyen national via des lignes spécialisées et des terminaux lourds, constitués localement d’une imprimante, d’un lecteur de cartes, d’une perforatrice, le tout parfois connecté à un ordinateur frontal comme l’IBM 7040.

ORDINATEUR	CAPACITÉ MÉMOIRE	POSITION GÉOGRAPHIQUE
I.B.M. 7 040	32 K*	Observatoire de Nice
Télemécanique Solar	80 K (16 bits)	Observatoire de Nice
I.B.M. 360 /65	512 K en rapide	Observatoire de Meudon
	2 048 K en lente	
I.B.M. 370 /168	3 000 K (plus mémoire virtuelle)	C.I.R.C.É. Orsay
I.B.M. 370 /168	4 000 K (plus mémoire virtuelle)	C.I.R.C.É. Orsay

* Le K est une mesure de la capacité d’une mémoire électronique qui vaut $2^{10} = 1\,024$ mots ; chaque mot étant lui-même formé d’un certain nombre de bits (unité élémentaire d’information, qui ne peut prendre que deux valeurs distinctes, 0 ou 1). Les mots sont en général de 8, 12, 16 ou 32 bits .

Tableau 1 : Caractéristiques des machines IBM accessibles aux astronomes au milieu des années 70

L’IBM 360/65 disposait de 512 Ko de mémoire rapide (1 micro seconde de cycle), et de 2048 Ko de mémoire de second plan, plus lente (8 micro secondes), sur 24 bits d’adressage. Il n’y avait pas de mémoire

virtuelle. Il effectuait environ 0.6 millions d'instructions par seconde. Les calculs les plus gourmands, pour résoudre par exemple, en physique solaire, les équations aux dérivées partielles de la dynamique des fluides couplées à celles de l'électromagnétisme, s'effectuaient sur les gros IBM 370/168 du CIRCE (Centre Inter Régional de Calcul Electronique du CNRS à Orsay, pluridisciplinaire et ouvert en 1969), plus rapides, pourvus d'un système à mémoire virtuelle, la mémoire principale étant de 4000 Ko (voir [tableau 1](#) ci-dessus).



Figure 62 : IBM 360/65 de l'INAG à l'Observatoire de Meudon dans les années 70 (crédit OP)

A l'époque de l'IBM 360/65, dans les années 70, une salle abritait à Meudon de nombreuses perforatrices de cartes servant à la fois à mémoriser du code FORTRAN (une instruction par carte) ou bien des données astronomiques. Des dérouleurs de bandes 800/1600 bpi permettaient aussi de stocker les données (de 20 à 40 Mo par bande selon la densité). Tout le travail s'effectuait en mode « batch », c'est-à-dire au sein d'une file d'attente, en temps différé. Il y avait un guichet, que j'ai connu en 1979, où l'on déposait son paquet ou sa boîte à cartes perforées. On retrouvait ses cartes et ses résultats plus tard sous forme de « listings » d'imprimante dans des casiers, voire de tracés « Benson » au stylo à encre. Gare à celui ou à celle qui renversait ses cartes en ayant omis de les numéroter ! Ce mode de fonctionnement, sans aucune interactivité, serait décourageant aujourd'hui, mais quel progrès à l'époque ! Toute erreur de programmation se traduisait par un rejet du programme à la compilation, et il fallait recommencer : perforation, soumission pour compilation, attente ! Mettre au point un programme complexe prenait bien du temps, mais c'était incontournable.

Le centre de calcul de l'INAG fut arrêté à la fin des années 70 suite au développement de l'informatique interactive dans les laboratoires (ordinateurs 32 bits VAX à mémoire virtuelle dès 1980). De plus, les besoins en calcul intensif (simulations numériques) étaient de plus en plus couverts par le Centre de Calcul du CNRS (CIRCE), machines auxquelles les chercheurs pouvaient accéder à distance via des terminaux lourds composés d'un lecteur de cartes perforées et d'une imprimante, puis des liaisons spécialisées.

Un centre de calcul vectoriel pour la recherche (CCVR équipé du mythique CRAY 1) fut créé ensuite et fusionna avec le CIRCE au sein d'un centre commun, l'IDRIS en 1993, qui a continué à se spécialiser en calcul haute performance, avec des machines au parallélisme massif depuis les années 2000.



Figure 63 : L'IBM 360/65 de Meudon et son pupitre de commande. A l'arrière plan on distingue au fond les dérouleurs de bande magnétique et le lecteur de cartes perforées à droite, avec un gros paquet de cartes en cours de lecture. Crédit OP.

SUPERCALCULATEURS CELEBRES					
Date	Nom	Puissance	Mémoire	Stockage typique	
1961	IBM 7030	1 Mflops	2 Mo		Barre du Mflops
1975	Cray 1	160 Mflops	8 Mo	300 Mo	
1985	Cray 2	2 Gflops	2 Go		Barre du Gflops
1997	IBM ASCI RED	1 Tflops	1 To		Barre du Tflops
2008	IBM RoadRunner	1 Pflops	100 To		Barre du Pflops
2022	HPE Frontier	1.1 Eflops	10 Po	700 Po	Barre du Eflops
SUPERCALCULATEURS NATIONAUX (TGCC-CEA, IDRIS-CNRS, CINES-MESR)					
2018	Joliot-Curie	22 Tflops	1 Po	30 Po	
2019	Jean ZAY	37 Tflops	335 To	30 Po	
2022	AdAstra	74 Tflops	525 To		
CENTRE DE CALCUL OBSERVATOIRE					
1970	IBM 360/65	0.3 Mflops	512/2048 Ko		INAG
1992	CONVEX 3440	400 Mflops	512 Mo	15 Go	OP
2022	MesoPSL	300 Tflops	35 To	2 Po	OP/PSL



Tableau 2 : liste de quelques supercalculateurs célèbres, nationaux, et locaux

Le [tableau 2](#) et la [figure 64](#) et le donnent l'évolution de la puissance de calcul en FLOPS (nombre d'opérations en virgule flottante par seconde) des super-calculateurs les plus rapides (et coûteux) depuis 1960, utilisés pour la modélisation numérique dans le monde. La barre du MFLOPS (10^6 FLOPS) a été franchie par l'IBM7030 « stretch » en 1961 puis les CDC6600 et 7600 (Control Data Corporation). Celle du GFLOPS (10^9 FLOPS) par le Cray2 en 1985. Celle du TFLOPS (10^{12} FLOPS) par ASCI RED (IBM) vers 1995. Celle du PFLOPS (10^{15} FLOPS) par Road Runner (IBM) en 2008. Et enfin, l'EFLOPS (10^{18} FLOPS) a été atteint par FRONTIER (HPE) en 2022. Les puissances de calcul exceptionnelles disponibles à partir de 2006 sont à mettre

au crédit des processeurs multi-cœurs et du parallélisme massif (plusieurs millions de cœurs sur machines exaflopiques), et de l'intégration d'accélérateurs GPU (Graphic Processing Units) venant épauler, en calcul vectoriel ou matriciel, les CPU classiques (Central Processing Units). Par exemple, sur les machines récentes HPE, chaque CPU AMD (64 cœurs) est associé à 4 GPU (comportant chacun 220 cœurs avec 64 processeurs de flux). Sur la [figure 64](#), on a placé pour comparaison les machines des centres de calcul nationaux de GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif) : JEAN ZAY (37 PFLOPS) à l'IDRIS (Institut du Développement et des Ressources en Informatique Scientifique du CNRS, successeur du CIRCE), ADASTRA (74 PFLOPS) au CINES (Centre Informatique National de l'Enseignement Supérieur).

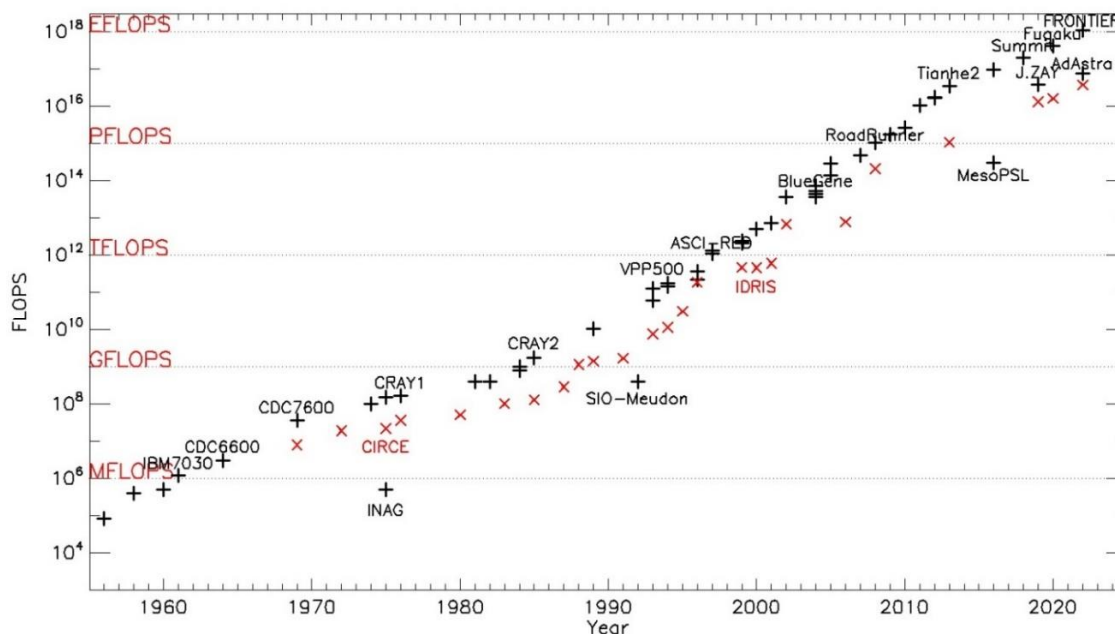


Figure 64 : Evolution de la puissance de calcul (FLOPS) des super-ordinateurs de modélisation numérique les plus performants entre 1960 et 2022 (échelle logarithmique). En échelle log, la progression reste une fonction affine du temps grâce à l'apparition (2006) des processeurs multi-cœurs et du calcul massivement parallèle sur GPU. Les croix rouges positionnent la puissance de calcul du CNRS (CIRCE depuis 1969 puis IDRIS après 1993). La capacité de calcul a été multipliée par **un milliard** en 45 ans. Document de l'auteur.

Entre les machines de laboratoire et les centres nationaux (IDRIS, CINES, TGCC), on trouve des installations intermédiaires à l'échelle d'une ou plusieurs universités, telle la machine parallèle du campus Meudonnais (MesosPSL) qui dessert l'Université PSL et offre actuellement une puissance considérable, voisine de 300 TFLOPS avec ses 7500 cœurs.

6 - QUELQUES REFERENCES UTILES (parfois en ligne sur <https://ui.adsabs.harvard.edu/classic-form>)

sur la spectroscopie, l'imagerie solaire, et l'observatoire de Meudon, œuvre de Janssen

J. Janssen, **1869a**, "Sur l'étude spectrale des protubérances solaires", *Comptes Rendus Académie des Sciences*, 68, 95.

J. Janssen, **1869b**, "Sur la méthode qui permet de constater la matière protubérantielle sur tout le contour du disque solaire", *Comptes Rendus Académie des Sciences*, 68, 713.

J. Janssen, **1869c**, "Méthode pour obtenir des images monochromatiques des corps lumineux", *British Association for the Advancement of Science*, 39, 23.

J. Janssen, **1896**, *Annales de l'Observatoire d'astronomie physique de Paris sis Parc de Meudon*, volume 1, Gauthier-Villars editor, Paris. On-line at Gallica/BNF. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6537478r>

J. Janssen, **1903**, "Atlas de photographies solaires", special issue of *Annales de l'Observatoire d'astronomie physique de Paris sis Parc de Meudon*, Gauthier-Villars editor, Paris. On-line at *Observatoire de Paris*. <https://bibnum.obspm.fr/ark:/11287/1MCjG>

J. Janssen, **1906**, *Annales de l'Observatoire d'astronomie physique de Paris sis Parc de Meudon*, volume 2 (1906), Gauthier-Villars editor, Paris. On-line at Gallica/BNF. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6537575v>

R. Le Cocquen and F. Launay, **2005**, "La lunette de photographie solaire Janssen", *L'Astronomie*, 119, 75.

F. Launay, **2008**, "un globe-trotter de la physique céleste, l'astronome Jules Janssen", *éditions Vuibert*

F. Launay, **2021**, "observations of the total solar eclipse of 18 August 1868 carried out by Jules Janssen at Guntoor, India", *JAAH*, 24(1), 114

sur le spectrohéliographe de Deslandres et d'Azambuja

H. Deslandres, **1910**, "Recherches sur l'atmosphère solaire. Photographie des couches gazeuses supérieures. Etude simultanée des formes et des mouvements des vapeurs". *Annales de l'Observatoire d'Astronomie Physique de Paris, sis parc de Meudon*, tome 4, Gauthier-Villars editor, Paris. On-line at Gallica/BNF, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k65373577>

L. d'Azambuja, **1920a**, "Le spectrohéliographe et les photographies quotidiennes de l'atmosphère du soleil. Part 1", *L'Astronomie*, 34, 433-446.

L. d'Azambuja, **1920b**, "Le spectrohéliographe et les photographies quotidiennes de l'atmosphère du soleil. Part 2", *L'Astronomie*, 34, 487-498.

L. d'Azambuja, **1930**, "Recherches sur la structure de la chromosphère solaire", thèse de Doctorat ès Sciences, *Annales de l'Observatoire de Paris, section d'astrophysique, à Meudon*, volume 8, fascicule 2, Gauthier-Villars editor, Paris. On-line at Gallica/BNF. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6537953n>

A. Dollfus, **2003a**, "Henri Deslandres et le spectrohéliographe. L'épopée d'une recherche. A l'observatoire de Paris 1891-1897", *L'Astronomie*, 117, 69.

A. Dollfus, **2003b**, "Henri Deslandres et le spectrohéliographe. L'épopée d'une recherche. A l'observatoire de Paris (suite) ", *L'Astronomie*, 117, 149.

A. Dollfus, **2005**, "Henri Deslandres et le spectrohéliographe. L'épopée d'une recherche à l'observatoire de Meudon 1898-1908", *L'Astronomie*, vol 119, 150.

sur le coronographe et le filtre de Lyot

B. Lyot, **1932**, "Etude de la couronne solaire en dehors des éclipses", *Zeitschrift für Astrophysik*, 5, 73.

B. Lyot, **1944**, "Le filtre monochromatique polarisant et ses applications en physique solaire", *Annales d'Astrophysique*, 7, 31.

sur les observations en ballon

A. Dollfus, **1959a**, "observations astronomiques en ballon libre", *L'Astronomie*, 73, 345.

A. Dollfus, **1959b**, "observations astronomiques en ballon libre, suite et fin", *L'Astronomie*, 73, 411.

sur les débuts de la radioastronomie à Meudon

Laffineur, M., Houtgast, J., **1949**, "observations solaires sur la longueur d'onde de 55 cm", *Annales d'Astrophysique*, 12, 137.

Laffineur, M., **1951**, "radioastronomie", *l'Astronomie*, 65, 379.